

VŠB-Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra konstrukcí

## **Dřevěné lávky v korunách stromů**

Wooden walkways in the trees

Student:

Bc. Zuzana Škorvánková

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra konstrukcí

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zuzana Škorvánková**  
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb  
Téma: **Dřevěné lávky v korunách stromů**  
**Wooden walkways in the trees**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor konstrukce
2. Návrh variant konstrukčního řešení.
3. Stanovení účinků zatížení působící na konstrukci (vítr, sníh).
4. Statický výpočet nosné konstrukce.
5. Návrh a posouzení vybraných spojů.
6. Dokumentace navržené konstrukce včetně vybraných detailů.

### Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí.
- [2] ČSN EN 1991-1-4: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná pravidla zatížení – Zatížení větrem.
- [3] ČSN EN 1995-1-1: Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [4] Koželouh, K.: Navrhování, výpočty a posouzení dřevěných stavebních konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ISBN:978-80-87093-73-3.
- [5] Odborné časopisy – Konstrukce, Stavitel, Stahlbau
- [6] Internet

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

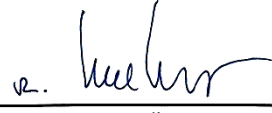
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Fojtík, Ph.D.**

Datum zadání: 27.02.2015

Datum odevzdání: 30.11.2015

  
doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

Bc. Zuzana Škorvánková

**Prohlašuji, že**

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

Bc. Zuzana Škorvánková



## **Anotace**

Škorvánková, Z.: *Dřevěné lávky v korunách stromů: Diplomová práce.*

Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí, 2015, s.227, Vedoucí práce: Fojtík, R.

Předmětem diplomové práce „Dřevěné lávky v korunách stromů“ je statický návrh a posouzení dřevěné konstrukce stezky dle zadání diplomové práce. Úvodní část práce se zabývá strukturou a vlastnostmi dřeva, historickým vývojem dřevěných lávek, konstrukčními systémy lávek a konečně přehledem již vybudovaných stezek v korunách stromů. Dalším krokem při zpracování bylo hledání vhodné varianty konstrukčního systému pro překlenutí rozpětí téměř dvaceti osmi metrů. Jednotlivé navržené varianty byly orientačně posouzeny a provedeny modální analýzy, následně pak dle adekvátních důvodů byla vybrána nejvhodnější varianta, která byla staticky posouzena pro mezní stav únosnosti i použitelnosti. Závěrem byly ověřeny vlastní frekvence konstrukce ve svislém, vodorovném a torzním směru. Posouzení bylo provedeno na základě platných norem.

### Klíčová slova:

Stezka korunami stromů, dřevěná lávka, spoje dřevěných konstrukcí, příhradová konstrukce, vlastní frekvence, statický výpočet, pěší turistika.

## **Abstract**

Škorvánková, Z.: *Wooden walkways in the trees: Diploma thesis.*

Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Department of Structure, 2015, s.227, Supervisor: Fojtík, R.

The subject of the thesis, called “Wooden walkways in the trees”, is a static proposal and opinion of the wood footbridge structure, according to the assignment of the thesis. Firstly, the work deals with a structure and features of wood, historical evolution and construction systems of timber footbridges, and review of already designed trails in the trees. The next level in the processing was to find the best variant of the construction system for 28m span of the footbridge. Variants have been assessed by estimate calculation. The modal analyses were performed, then the fittest variant of the structure was chosen. The final variant was assessed by for the ultimate limit states and serviceability limit states. Finally, the natural frequencies of the construction were verified. The verification of this was implemented in vertical, horizontal and torsion direction. The assessment was realized according to the actual European standards.

### **Keywords:**

Treetop walkway, timber footbridge, joining of the timber structures, truss structure, natural frequency, statics calculation, hiking

# Struktura diplomové práce

## **-A-           Textová část**

Úvod

Dřevo pro konstrukce

Historický vývoj lávek

Konstrukční systémy lávek

Stezka ve stromech

Variantní řešení

## **-B-           Statický výpočet**

Zatížení

MKP model

Návrh a posouzení nosných prvků

Návrh a posouzení vybraných detailů

Modální analýza

## **-C-           Výkresová dokumentace + přílohy**

Výkresová dokumentace včetně vybraných detailů + přílohy

# OBSAH

Seznam použitého značení .....	- 1 -
1 Úvod .....	- 6 -
2 Dřevo pro konstrukce .....	- 7 -
2.1 Makroskopická stavba dřeva .....	- 8 -
2.1.1 Letokruhy .....	- 10 -
2.2 Běl, zralé dřevo, jádro .....	- 12 -
2.2.1 Dřeň .....	- 13 -
2.2.2 Dřeňové paprsky .....	- 13 -
2.2.3 Pryskeřičné kanálky .....	- 14 -
2.2.4 Cévy .....	- 14 -
2.2.5 Suky .....	- 14 -
2.3 Mikroskopická stavba dřeva .....	- 14 -
2.3.1 Mikroskopická stavba jehličnatých dřevin .....	- 14 -
2.3.2 Mikroskopická stavba listnatých dřevin .....	- 15 -
2.4 Vlastnosti dřeva .....	- 16 -
2.4.1 Fyzikální vlastnosti dřeva .....	- 16 -
2.4.2 Mechanické vlastnosti dřeva .....	- 19 -
2.4.3 Trvanlivost dřeva .....	- 19 -
3 Historický vývoj lávek .....	- 20 -
3.1 Starověk .....	- 20 -
3.2 Středověk .....	- 23 -
3.2.1 Kaplový most .....	- 23 -
3.2.2 Radošovský most .....	- 24 -
3.2.3 Zvedací mosty .....	- 24 -
3.2.4 Mosty Andrey Palladia .....	- 25 -
3.3 Novověk .....	- 27 -
3.3.1 Most Kintai .....	- 27 -
3.3.2 Matematický most .....	- 28 -
3.3.3 Walton bridge .....	- 29 -
3.3.4 Most v Schaffhausenu .....	- 29 -
3.3.5 Železniční mosty v USA .....	- 30 -
3.4 Moderní mosty .....	- 31 -

4	Konstrukční systémy lávek .....	- 32 -
4.1	Dřevobetonové deskové/trámové lávky .....	- 33 -
4.2	Trámové lávky .....	- 34 -
4.3	Příhradové lávky .....	- 35 -
4.4	Věšadlové, vzpěradlové a vzpínadlové systémy .....	- 36 -
4.5	Oblouky .....	- 38 -
4.6	Zavěšené mosty .....	- 38 -
4.7	Visuté mosty .....	- 39 -
4.8	Mosty ve tvaru řetězovky (lanové) .....	- 40 -
5	Stezka ve stromech .....	- 41 -
5.1	Realizované stezky .....	- 41 -
5.1.1	Stezka korunami stromů na Kramolíně u Lipna .....	- 41 -
5.1.2	Stezka v oblacích v Dolní Moravě pod Králickým Sněžníkem .....	- 42 -
5.1.3	Stezka korunami stromů v Německu .....	- 43 -
5.1.4	Stezka korunami stromů na ostrově Rujána na Baltském moři .....	- 43 -
5.1.5	Capilano Suspension Bridge Park v Kanadě .....	- 44 -
5.2	Seznámení se vstupy pro vypracování diplomové práce .....	- 45 -
5.3	Přehled požadavků na konstrukci .....	- 46 -
5.3.1	Požadavky mezních stavů .....	- 46 -
5.3.2	Technologické požadavky .....	- 47 -
5.3.3	Provozní požadavky .....	- 47 -
5.3.4	Hospodárnost .....	- 47 -
5.3.5	Požární odolnost .....	- 47 -
5.4	Aplikované vzorce .....	- 47 -
5.4.1	Mezní stav použitelnosti .....	- 48 -
5.4.2	Mezní stav únosnosti .....	- 49 -
5.4.3	Modální analýza .....	- 55 -
5.5	Variantní řešení .....	- 60 -
5.5.1	Seznámení s variantami .....	- 61 -
5.5.2	Výsledky variantního řešení .....	- 65 -
5.5.3	Porovnání variant pro rozpětí 27,9 m .....	- 93 -
5.5.4	Shrnutí dynamických vlastností variant .....	- 98 -
5.5.5	Varianta „Lipno“ .....	- 99 -

5.5.6	Porovnání variant s vnitřními podporami.....	- 102 -
5.5.7	Shrnutí dynamických vlastností variant s vnitřními podporami .....	- 103 -
5.5.8	Porovnání poměru hmotnosti k tuhosti variant s vnitřními podporami a bez podpor.....	- 104 -
5.6	Závěr k diskuzi o variantách.....	- 106 -
6	Statický výpočet vybrané varianty .....	- 108 -
6.1	Základní údaje .....	- 108 -
6.2	Vlastnosti použitých materiálů .....	- 108 -
6.3	Zatížení .....	- 109 -
6.3.1	Zatížení stálá .....	- 109 -
6.3.2	Zatížení proměnná.....	- 110 -
6.4	Numerický model .....	- 122 -
6.5	Zatěžovací stavy a kombinace zatížení .....	- 123 -
6.6	Návrh a posudek prvků.....	- 126 -
6.6.1	Mostiny.....	- 126 -
6.6.2	Zábradlí .....	- 128 -
6.6.3	Horní pásy .....	- 134 -
6.6.4	Dolní pásy .....	- 139 -
6.6.5	Diagonály v úrovni mostovky .....	- 143 -
6.6.6	Diagonály v šikmé rovině .....	- 149 -
6.6.7	Příčnice krajní .....	- 152 -
6.6.8	Příčnice vnitřní.....	- 157 -
6.6.9	Svislice .....	- 162 -
6.6.10	Sloupy typu „trojnožka“ .....	- 163 -
6.6.11	Sloupy typu „roznožka“ .....	- 178 -
6.6.12	Táhla.....	- 186 -
6.6.13	Dřevěné ztužení sloupů .....	- 187 -
6.7	Návrh a posudek vybraných spojů.....	- 193 -
6.7.1	Detail A .....	- 193 -
6.7.2	Detail B .....	- 208 -
6.8	Modální analýza .....	- 215 -
7	Závěr.....	- 217 -
	Poděkování.....	- 219 -

8	Seznam použité literatury:.....	- 220 -
8.1	Normy .....	- 220 -
8.2	Literatura .....	- 220 -
8.3	Internetové zdroje .....	- 221 -
8.4	Seznam použitých výpočetních a grafických programů .....	- 223 -
8.5	Seznam obrázků.....	- 223 -
8.6	Seznam tabulek.....	- 226 -
8.7	Seznam grafů .....	- 227 -

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí



ČÁST -A-

Textová část



## Seznam použitého značení

Písmena velké latinské abecedy

$A$	plocha [mm <sup>2</sup> ]
$A_s$	plocha jádra šroubu [mm <sup>2</sup> ]
$A_{osl}$	oslabená plocha [mm <sup>2</sup> ]
$A_{ef}$	efektivní plocha [mm <sup>2</sup> ]
ČSN	česká technická norma
$E$	modul pružnosti [MPa]
$E_k$	kinetická energie [J]
$E_p$	potenciální energie [mm <sup>2</sup> ]
$E_{0,05}$	hodnota 5 % kvantilu modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny [MPa]
$F$	zatížení [kN]
$F_{ax,Rk}$	únosnost na vytažení [kN]
$F_{v,Rk}$	charakteristická únosnost spojovacího prostředku [kN]
$F_{v,Rd}$	návrhová únosnost spojovacího prostředku [kN]
$F_{k,q}$	soustředěné zatížení proměnné [kN]
$G_{k,j}$	charakteristická hodnota j-tého stálého zatížení [kN]
$G_{0,05}$	hodnota 5 % kvantilu modulu pružnosti ve smyku rovnoběžně s vlákny [MPa]
$I_{tor}$	moment setrvačnosti v kroucení [mm <sup>4</sup> ]
$I$	moment setrvačnosti [mm <sup>4</sup> ]
$I_v$	intenzita turbulence
$K$	matice tuhosti
$L_{cr,y}, L_{cr,z}$	vzpěrné délky pro vybočení v rovině nebo z roviny prvku [mm]
$L_{w,min}$	minimální délka svaru [mm]
$L_w$	skutečná délka svaru [mm]
$M$	matice hmotnosti uvažované konstrukce
$MSÚ$	mezní stav únosnosti
$MSP$	mezní stav použitelnosti

$M_{Ed}$	návrhový ohybový moment [kNm]
$M_{y,Rk}$	plastický moment únosnosti [kNm]
$N$	maximální osová síla [kN]
$N_0$	předpínací síla [kN]
$N_w$	vodorovná složka síly [kN]
$N_{Rd}$	jmenovitá únosnost [kN]
$N_{Ed}$	návrhová normálová síla [kN]
$N_{t,Rd}$	návrhová únosnost plechu v tahu [kN]
$P$	zatížení od předpětí [kN]
$Q_{k,1}$	charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení [kNm <sup>-2</sup> ]
$Q_{k,i}$	charakteristická hodnota vedlejšího i-tého proměnného zatížení [kNm <sup>-2</sup> ]
$Q_{flk}$	vodorovná složka od proměnného zatížení dopravou [kNm <sup>-2</sup> ]
$Q_{f,wk}$	soustředěné zatížení od dopravy [kN]
$R$	maximální reakce [kN]
$Re$	Reynoldsovo číslo
$V_{Ed}$	návrhová smykova síly [kN]
$V_w$	svislá složka síly [kN]
$W$	průřezový modul [mm <sup>3</sup> ]

#### Písmena malé latinské abecedy

$a$	účinný rozměr svaru [mm]
$b$	šířka [mm]
$c_{season}$	součinitel ročního období
$c_{dir}$	součinitel směru větru
$c_s, c_d$	součinitele konstrukce
$c_{f,z}$	součinitelé síly
$c_r$	součinitel drsnosti terénu
$b_{ef}$	efektivní šířka zohledňující vliv trhlin [mm]
$b_l$	celková šířka mostu [mm]
$d$	průměr lana [mm]
$d_{ef}$	účinný průměr [mm]
$d_{op}$	průměr otvoru v plechu [mm]

$d_p$	minimální průměr podložky [mm]
$f_{c,90,d}$	návrhová pevnost v tlaku kolmo na vlákna [MPa]
$f_{c,90,k}$	charakteristická pevnost v tlaku kolmo na vlákna [MPa]
$f_{c,0,k}$	charakteristická hodnota pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny [MPa]
$f_{c,0,d}$	návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny [MPa]
$f_{m,k}$	charakteristická pevnost v ohybu [MPa]
$f_{m,d}$	návrhová pevnost v ohybu k hlavním osám [MPa]
$f_{t,0,k}$	charakteristická pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny [MPa]
$f_{h,1,k}$	charakteristická pevnost v otláčení ve dřevu [MPa]
$f_u$	mez pevnosti oceli [MPa]
$f_{u,k}$	charakteristická pevnost v tahu [MPa]
$f_{v,k}$	charakteristická pevnost ve smyku [MPa]
$f_{v,d}$	návrhová pevnost ve smyku [MPa]
$f_{yd}$	mez kluzu [MPa]
$g_k$	charakteristická hodnota stálého zatížení [kN.m <sup>-2</sup> ]
$i$	poloměr setrvačnosti [mm]
$i_y$	poloměr setrvačnosti k ose y [mm]
$i_z$	poloměr setrvačnosti k ose z [mm]
$k_{c,y}$ a $k_{c,z}$	součinitel vzpěrnosti
$k_{crit}$	součinitel zohledňující redukovanou pevnost v ohybu v důsledku příčné a torzní nestability
$k_{def}$	deformační součinitel
$k_I$	součinitel turbulence
$k_{cr}$	redukční součinitel zohledňující vliv trhlin
$k_m$	součinitel zohledňující vliv redistribuce ohybových napětí v průřezu
$k_{mod}$	modifikační součinitel
$k_r$	součinitel terénu
$k_{mod}$	modifikační součinitel
$k_{z,y}$	součinitel

$l$	rozpětí, délka [mm]
$l_{ef}$	účinná délka [mm]
$n$	počet kusů
$q_k$	charakteristická hodnota proměnného zatížení [ $\text{kN.m}^{-2}$ ]
$q_{k,ch,m}$	liniové zatížení od chodců na mostinu [ $\text{kN.m}^{-1}$ ]
$r$	vlastní tvar kmitání příslušný k vlastní frekvenci, poloměr
$s_k$	charakteristická hodnota zatížení sněhem [ $\text{kN.m}^{-2}$ ]
$s'_k$	liniové zatížení sněhem [ $\text{kN.m}^{-1}$ ]
$\check{s}$	roznášecí šířka [mm]
$t$	tloušťka [mm]
$t_p$	minimální tloušťka podložky [mm]
$u$	matice deformací
$v$	kinematická viskozita vzduchu [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ]
$v(z_e)$	rychlost větru
$w_c$	hodnota předepsaného nadvýšení [mm]
$w_{celk}$	průhyb celkový [mm]
$w_{fin}$	finální průhyb [mm]
$w_G$	průhyb od vlastní tíhy [mm]
$w_{inst}$	okamžitý průhyb [mm]
$w_{net,fin}$	čistý finální průhyb [mm]
$w_Q$	průhyb od síly [mm]
$z_e$	referenční výška objektu [m]
$z_{min}$	minimální výška objektu [m]
$z_{max}$	maximální výška objektu [m]

#### Písmena řecké abecedy

$\beta_c$	součinitel křivosti
$\beta_{LW}$	smykové napětí rovnoběžně s osou svaru
$\beta_w$	korekční faktor
$\gamma_M$	dílčí součinitel spolehlivosti materiálu
$\gamma_q$	součinitel spolehlivosti pro proměnné zatížení

$\gamma_k$	součinitel spolehlivosti pro stálá zatížení
$\gamma_P$	dílčí součinitel pro zatížení od předpětí
$\gamma_{G,j}$	dílčí součinitel j-tého stálého zatížení
$\lambda_{rel,y}$	poměrný štíhlostní poměr odpovídající pohybu kolem osy y
$\lambda_{rel,z}$	poměrný štíhlostní poměr odpovídající pohybu kolem osy z
$\lambda_y$	štíhlostní poměr odpovídající pohybu kolem osy y
$\lambda_z$	štíhlostní poměr odpovídající pohybu kolem osy z
$\rho_k$	hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
$\sigma_{m,crit}$	kritické napětí v ohybu pro celistvý obdélníkový průřez [MPa]
$\sigma_{m,d}$	návrhové napětí v ohybu [MPa]
$\sigma_{t,0,d}$	návrhové napětí v tahu rovnoběžně s vlákny [MPa]
$\sigma_{c,0,d}$	návrhové napětí v tahu rovnoběžně s vlákny [MPa]
$\sigma_w$	náhradní napětí pod úhlem k ose svaru [MPa]
$\sigma_{\perp}$	normálové napětí kolmé na nebezpečný průřez a smykové napětí kolmé o ose svaru [MPa]
$\tau_d$	návrhová napětí ve smyku [MPa]
$\tau_{\parallel}$	smykové napětí rovnoběžně s osou svaru [MPa]
$\varphi$	pootočení [°]
$\psi_{0,i}$	součinitel pro kombinační hodnotu proměnného zatížení
$\psi_2$	kombinační součinitel vedlejšího proměnného zatížení
$\theta$	tvar kmitání

# **1 Úvod**

Diplomová práce je vypracována dle rozsahu zadání diplomové práce. Předmětem vypracování této práce je statický návrh a posouzení dřevěné konstrukce stezky korunami stromů. Cílem je návrh té nejekonomičtější a nejvhodnější varianty s ohledem k požadavkům, které jsou na konstrukci kladeny. Součástí práce je tedy uvážení několika variant možných řešení a výběr té nejvhodnější konečné varianty, dle adekvátních důvodů. Práce obsahuje výpočet hlavních nosných částí konstrukce, návrh a posouzení vybraných detailů a zpracování výkresové dokumentace včetně vybraných detailů. Základem pro zpracování této práce, která je zaměřena na dřevo jako konstrukčního materiálu, je znalost jeho struktury a složení, fyzikálních a mechanických vlastností. Tato problematika je krom jiného předmětem teoretické části této práce. Součástí teoretické části je i výklad historického vývoje dřevěných lávek, konstrukčních systémů lávek a seznámení s již realizovanými konstrukcemi lávek v korunách stromů.

## **2 Dřevo pro konstrukce**

Dřevo je používáno pro stavební účely již od pradávna a patří pravděpodobně vůbec k těm nejstarším. Vzhledem k tomu, že dřevo není příliš trvanlivým materiálem na rozdíl od jiných stavebních materiálů, jako je např. kámen, nejsou nejstarší dřevěné stavby zachovány. I přesto lze jejich podobu vydedukovat z podoby dřevěných staveb dnešních primitivních kultur. V dávné minulosti mělo dřevo velký význam především z důvodu snadné dosažitelnosti, manipulace, zpracovatelnosti, dobrých tepelných vlastností a relativně malé hmotnosti. Je to všestranný a nejrozšířenější přírodní materiál, který člověk vyhledává a používá dodnes. Pro svůj přírodní charakter, přirozenou kresbu, specifický estetický výraz a z toho vyplývající příznivé působení po psychické stránce, předpokládáme, že zůstane natrvalo stále žádanějším prvkem životního prostředí člověka. Ochrana životního prostředí je dalším pádným důvodem, proč se dřevo těší stále větší oblibě. Dřevo je obnovující se surovina a při správném hospodaření v lesích existuje neomezený potenciál pro doplňování jeho zásob. Dokážeme ho prakticky zcela využít a nevzniká téměř žádný odpadový materiál. Výrobky ze dřeva mohou mít i řadu nedostatků jako je velká variabilita vlastností v důsledku měnících se podmínek během vzniku dřeva a je nutno ho považovat za velmi heterogenní materiál. Dalšími nepříznivými vlastnostmi dřeva jsou snadná zápalnost, hořlavost, značná navlhavost a nasákavost, ovlivňující tvar a vlastnosti dřeva a relativně malá odolnost vůči působení biotických činitelů. I přes řadu svých nedostatků je dřevo vyhledávaným materiálem s širokým rozsahem využití. [16] [18] [19]

Prohlubováním poznatků o vnitřní struktuře, chemickém složení, fyzice dřeva a jeho mechanických vlastností se současně rostoucí modernizací po stránce technické a technologické je dřevo zpracováváno do mnoha podob. Stále více jsou využívány stavební materiály na bázi dřeva, jako jsou např. dřevovláknité, dřevocementové, dřevotřískové a lignitové desky. Dále pak dřevo aglomerované, laťovky, dýhy, dřevo vrstvené, a dnes s velkou výhodou často používané lepené dřevo. Lepené prvky mají řadu výhod. Složením většího počtu desek je možné vyloučit podstatné vady dřeva a zvýšit tím dovozené namáhání. Velké průřezy z lepených částí lépe odolávají ohni. Zároveň v méně namáhaných částech průřezu lze použít dřevo nižších tříd. Stromy mají svůj přírodní charakter a ne vždy se podaří ze stromu opracovat masivní rovný, dostatečně dlouhý konstrukční prvek bez vad, trhlin, zakřivení a jiných anomálií. Proto je masivní rostlé dřevo svým počtem omezené, obtížně se

shání a je poměrně dražší. Pomocí technologie lepení a použití vhodných průřezů lze ušetřit až 20 až 30 % dřeva. V současné době rovněž roste trend prostorových dřevěných nosných soustav, které umožňují překlenout velká rozpětí a vytvořit zajímavý architektonický prvek. [14]

## 2.1 Makroskopická stavba dřeva

Dřevem se rozumí hmota organického původu, která se vytváří přírodními procesy. Představuje soubor rostlinných pletiv, jejichž převážná část buněk má zděvnatělé buněčné stěny. Jedná se o substanci mezi dřením a kůrou obsahující lignin a celulózu. Je to nehomogenní, anizotropní a hydrokopický materiál. Zmíněné vlastnosti jsou dané mikroskopickou a makroskopickou stavbou dřeva. Makroskopická stavba dřeva je významným prvkem určování dřeva, jakostních tříd a rozlišování vad dřeva. [15] [16]

Struktura dřeva a z ní vyplývající kvalitativní vlastnosti dřeviny závisí na podmínkách života stromu. Jedná se o klimatické, stanovištní a pěstební podmínky. Např. smrkové dřevo v horských oblastech je úzkoleté a je tvrdší, pevnější a trvanlivější a v suchém stavu těžší než dřevo smrkové rostoucí v polohách nízkých. Tvar kmene určuje zejména kvalita a hloubka půdní vrstvy. Koresponduje-li tvar kmene s tvarem válce, hovoří se o plnodřevném kmeni (např. u jedle). V opačném případě je-li kmen obdobný jehlanu, hovoříme o vadě zvané sbíhavost kmene. Tato vada se může projevovat především u nízkých dřevin na chudých půdách, anebo u solitérů. Stejný druh stromu rostoucí o samotě (solitér) dosahuje nižší výšky s nízko posazenou korunou a její kmen je hrbolatý. Z praktického hlediska mají dřeviny rostoucí v lesích kvalitnější kmenové dřevo. [18] [19]

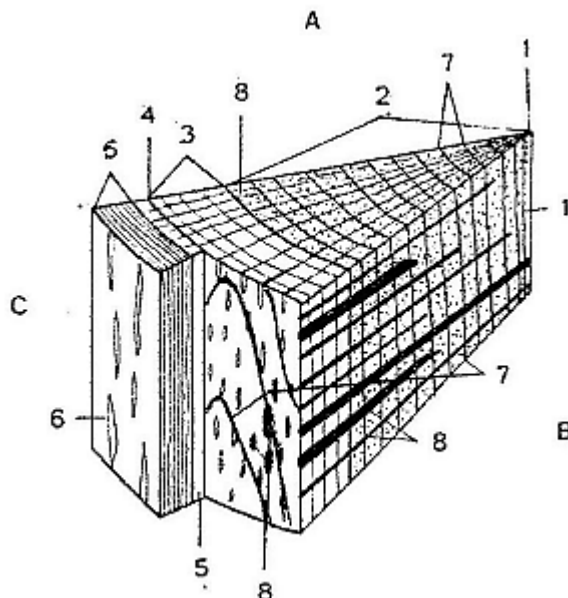
Dřevo se skládá z velké části z celulózy (cca 55 %), z hemicelulózy (cca 22 %) a ligninu (cca 22 %), které tvoří buněčné stěny. Zbývající látky vytváří vnitřek buněk a patří k nim pryskyřice, tuky, vosky, třísloviny, barviva, alkaloidy a látky minerální. [16]

Chemicky se dřevo skládá ze stejných prvků a to zhruba ve shodném množství. Organické látky tvoří převážnou část dřeva a obsahují přibližně 50% uhlíku, 43% kyslíku 6 % vodíku a 0,3 % dusíku. Zbývajících 0,7 % tvoří minerální látky, obsahující draslík, sodík, vápník, fosfor, hořčík aj. [16]

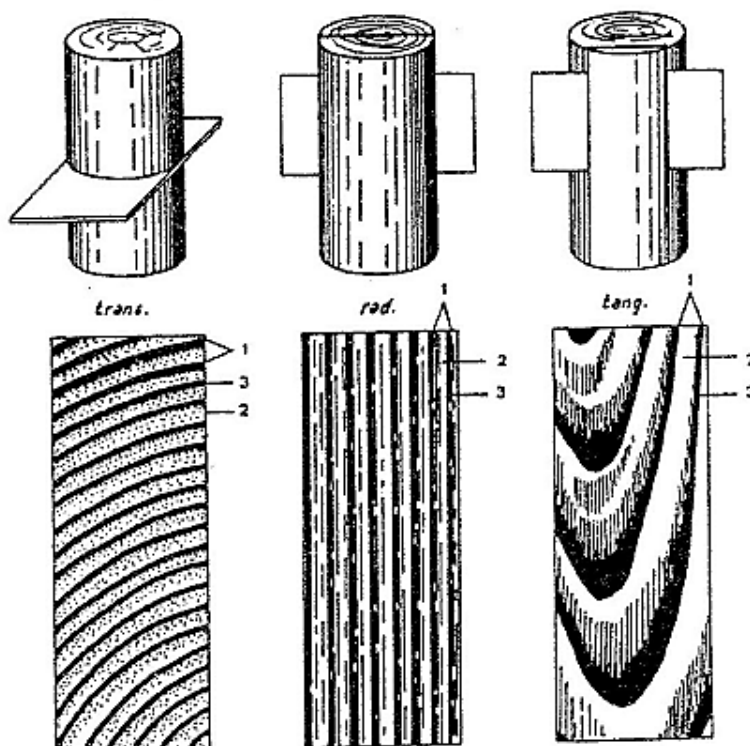
Skladba (struktura) dřeva je označení pro složení dřeva na příčném řezu. Směrem od obvodu kmene lze identifikovat vrstvu kůry, jejíž spodní část se nazývá lýko. Pod kůrou je



kambium, dřevo a dřeň (obr.č.1). Představu o zastoupení jednotlivých vrstev lze získat pozorováním základních řezů dřevem (obr. č. 2) [19] [14]



Obr. č.1: Makroskopická struktura dřeva na jednotlivých řezech: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez; 1 – dřeň, 2 - jádro, 3 - běl, 4 - kambium, 5 - lýko, 6 - kůra, 7 - letokruh, 8 – dřeňové paprsky [19]



Obr. č. 2: Základní řezy dřevem: 1 – letokruh, 2 – jarní dřevo, 3 – letní dřevo, [19]

### 2.1.1 Letokruhy

Letokruh je tloušťkový (radiální) přírůstek dřeva, vzniklý během jednoho vegetačního období. Rozlišitelnost letokruhů je závislá na vnitřní stavbě letokruhů, t.j. stavbě jarního a letního dřeva. Na základě vnitřní stavby dělíme u nás rostoucí dřeviny na jehličnaté dřevo a dřevo listnaté kruhovitě a roztroušeně pórovité. U dřevin v mírném a chladném pásmu dochází k přerušení tloušťkového růstu v období vegetačního klidu. Výsledkem jsou letokruhy. Stálé dřevěné dřeviny tropického a subtropického pásma tvoří dřevo nepřetržitě v průběhu celého roku bez rozlišení letokruhů nebo tvoří přírůstkové zóny, které neodpovídají jednotlivým rokům, ale střídání suchých a vlhkých období. Přírůstkové zóny je možné zřetelně rozeznat u stálé zelených dřevin evropského středomořského pásma s mírnou zimou. [15] [19].

Za určitých podmínek, působením biotických činitelů a abiotických faktorů, se mohou za jedno vegetační období vytvořit dva letokruhy. Takto vzniklé letokruhy se označují jako nepravé letokruhy, vyznačující se menší šířkou a méně zřetelným ohraničením způsobené neúplnou stavbou letokruhu. V určitých případech se letokruhy nemusí vytvořit vůbec. Tento jev je charakteristický pro okrasné dřeviny nebo pro slabé, silně zastíněné stromy. [19]

Jehličnaté dřeviny mají výraznou vrstvu letního dřeva a nejvýraznější rozdíl mezi jarním a letním dřevem. Jarní dřevo je světlejší a zřetelně měkčí, letní dřevo je tmavší, výrazně tvrdší s dva až třikrát vyšší hustotou. Zastoupení jarního dřeva v letokruhu je zpravidla vyšší. Dřevo našich jehličnanů je možné seřadit dle výraznosti mezi letním a jarním dřevem (od nejvýraznější k pozvolné) následovně: modřín, douglaska, borovice, tis, jedle, smrk, jalovec, vejmutovka. [18] [19].

Listnaté kruhovitě pórovité dřeviny mají výrazné jarní dřevo. Obsahuje velké póry (jarní cévy) o velikosti 0,2 až 0,4 mm viditelné pouhým okem v příčném řezu jako okrouhlé otvory. Podíl letního dřeva je zpravidla vyšší než dřeva jarního a přechod mezi nimi je zřetelně vylišený. [18] [19].

Listnaté roztroušeně pórovité dřeviny mají z dřevin mírného pásma nejméně výrazné roční kruhy. Letokruhy jsou nejčastěji zvýrazněné pouze tenkou tmavší vrstvou pozdního letního dřeva. Nejméně zřetelné kruhy mají bříza, habr, topol, vrba, olše. Nejvýraznější

letokruhy této skupiny má javor, jeřabina ptačí, buk, platan. V celém letokruhu se vyskytují úzké cévy, které nejsou makroskopicky viditelné. [18] [19].

Některé dřeviny tvoří přechod mezi kruhovitě pórovitou a roztroušeně pórovitou skupinou. Jedná se např. o ořech. Má sice velké cévy, viditelné pouhým okem, ale jsou roztroušené po celém ročním kruhu a tedy ho nijak nezvýrazňují. Ročné kruhy jsou málo výrazné podobně jako u roztroušeně pórovitých dřevin. [18].

#### **2.1.1.1 Tvar a šířka letokruhů**

Šířka letokruhů se odvíjí v závislosti na druhu a stáří dřeviny, podmínkách růstu zahrnující stanovištní a klimatické podmínky, sociální postavení stromu v porostu a pěstební podmínky. Hospodářsky významné dřeviny na našem území se šířka letokruhů pohybuje obvykle v rozmezí od jednoho do pěti milimetrů. Mezi šířkou koruny a šířkou letokruhů je úzká souvislost. Šířka letokruhů stromů s malými korunami nemusí dosáhnout ani jednoho milimetru. Naopak u stromů s velkými korunami může šířka letokruhů dosáhnout hodnot 5 až 10 mm. Tzv. rychlerostoucí dřeviny, kulturní odrůdy, kříženci kříženců topolu černého a topolu kanadského (euroameričtí topoly) dosahují při vysazování v rozponu 7 až 10 m na nej kvalitnějších půdách s vysokou hladinou podzemní vody, v inundačním území, kde jarní záplavy obohacují půdní humus, šířky ročních kruhů až 30 mm. Zároveň tyto dřeviny dosahují i velký roční výškový přírůstek (1,5 až 2,5 m), tzn., že po 10ti až 15ti letech jsou dřeviny připraveny ke kácení. [18]

U dubového dřeva pro výrobu krájených dýh jsou nejkrásnější rovnoměrné úzké roční kruhy (1 až 2 mm). Tvorba jen úzkých ročních kruhů patří u některých odrůd dubového dřeva ke genetickým vlastnostem. Podobně pro jemnou texturu jsou ceněny jehličnaté severské dřeviny (Finsko, Švédskou, Sibiř) s úzkými a hustými letokruhy, způsobené krátkým vegetačním obdobím v této oblasti. [18]

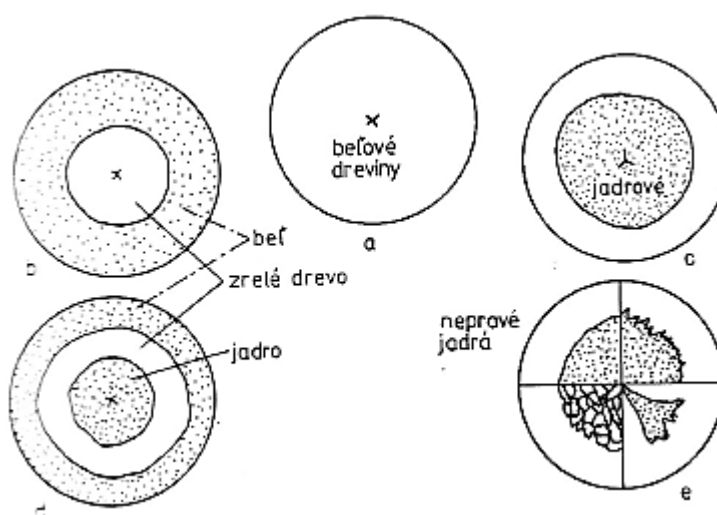
U jehličnatých dřevin se vzrůstající šířkou letokruhu klesá podíl letního dřeva. Naopak u dřevin listnatých kruhovitě pórovitých podíl letního dřeva stoupá. U dřevin roztroušeně pórovitých nelze tuto závislost stanovit. Šířka ročních kruhů a podíl letního dřeva jsou důležitými ukazateli fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Obecnou závislostí je, že se stoupajícím podílem letního dřeva v letokruhu se hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností zvyšují. U dřev jehličnatých dřevin se zvyšující se šířkou letokruhu hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností snižují. Za kritérium pro hodnocení lze považovat

počet letokruhů na 1 cm. Dub má mít maximálně 12 letokruhů na 1cm, jasan letokruhů 10.

[18] [19]

## 2.2 Běl, zralé dřevo, jádro

Podle rozmístění a charakteru barevných zón pozorovatelné po těžbě rozdělujeme dřeviny na bělové a jádrové (obr. č.3). K bělovým se přiřazují dřeviny s vyzrálým dřevem, u nichž není jádro barevně odlišeno. Mezi bělové dřeviny patří např. bříza, javor. Do skupiny s vyzrálým dřevem řadíme např. smrk, buk, jedli a lípu. Mezi jádrové dřeviny lze zařadit modřín, borovici, dub a třešeň. Do skupiny s jádrem i vyzrálým dřevem patří např. jasan a jíva. [29]



Obr. č.3: Rozdělení dřevin dle rozmístění a charakteru barevných zón: a – jednobarevný čelní řez bělových dřevin, b – dřeviny s bělí a zralým dřevem, c – jádrové dřeviny s bělí a jádrem, d – jádrové dřeviny se zónou vyzrálého dřeva, e – tvary nepravých jader

Běl je světlejší, obvodová část dřeva přiléhající ke kambiu, v případě, že je vytvořeno jádro. Některé dřeviny vykazují pouze běl po celé ploše příčného řezu (bělové dřeviny). Fyziologická funkce běle rostoucího stromu spočívá ve vedení vody s minerálními látkami z kořenů k listům a v ukládání zásobních látek. S vodivou funkcí běle souvisí i její vyšší vlhkost. Na běl navazuje jádro, které je zbarveno tmavěji, nebo dřevo vyzrálé (světlejší část středové části kmene), a nebo představuje různě širokou obvodovou část u dřevin, které mají jednotné zbarvení po celém průřezu. Běl je vzhledem ke své anatomické struktuře

propustnější pro vodu než dřevo vyztužené nebo jádro. Je méně trvanlivé a odolné vůči biologickým činitelům vzhledem ke svému chemickému složení. [19].

Jádro je tmavší část v centru kmene. Má nižší vlhkost, vykazuje vyšší hustotu, nižší sesychání, je trvanlivější a tedy lépe odolává dřevokazným činitelům. Jádro lze pokládat za fyziologicky mrtvé pletivo, které ztratilo vodivou funkci a neobsahuje živé parenchymatické buňky. Někdy má jádro horší vlastnosti než bělové dřevo, protože se jedná o tzv. juvenilní dřevo, což je dřevo z prvních let růstu stromu, které má nižší hustotu a z toho vyplývající pevnost a tuhost. [12] [19]

V střední části příčného řezu kmene se u některých bělových dřevin a listnatých dřevin s vyztuženým dřevem se často objevuje (buk, bříza, javor) tzv. nepravé jádro je zařazováno do vad dřeva. Nepravé jádro je nenormální zbarvení vnitřní části dřeva u dřevin, které jádro za normálních okolností netvoří. Zbarvení má různé odstíny, intenzitu a stejnoměrnost. Jeho hranice se zpravidla nekryjí s letokruhy. Základní podmínkou pro vznik nepravého jádra je přítomnost dostatečného množství vzduchu v kmeni. Příčinou vniku vzduchu je např. mechanické poškození kmene nebo rána po odlomení větve. Další vstupní branou může být i odumřelá dřev. Druhou podmínkou vzniku je snížení vitality parenchymatických buněk, zejména v dřevných paprscích. Příčinou tohoto jevu je působení extrémně nízkých teplot nebo působení hub. Tvrdost dřeva většinou není snížena. Lze však předpokládat destrukční činnost hub. [28]

### **2.2.1 Dřeň**

Ve středu příčného řezu se nachází u většiny našich dřevin dřev. Jedná se o útvar o velikosti pohybující okolo dvou až pěti mm. Bývá měkčí než okolní dřevo a jen u buku dřevnatí. Jen zřídka bývá v přesné geometrickém středě. Obvykle je více nebo méně na příčném řezu excentricky posunutý. Mívá různé tvary dle druhu dřevin. Většina dřevin má tvar dřevě okrouhlý. Buk a olše má dřev trojúhelníkový, jasan čtyřúhelníkový, topol pětiúhelníkový, borovice a dub hvězdovitý. [18]

### **2.2.2 Dřevné paprsky**

Jsou tvořeny soubory parenchymatických buněk orientovanými kolmo na osu kmene. V živém stromě zajišťují horizontální pohyb organických látek a vody a má rovněž zásobovací funkci. Jsou spolehlivým poznávacím prvkem. Rozhodující pro diagnostiku jsou jejich šířka, výška a rozložení na jednotlivých řezech. [15]

### 2.2.3 Pryskyřičné kanálky

Na příčném řezu jsou viditelné jako drobné tečky, obvykle tmavší, ale jen minimálně odlišitelné od okolního dřeva. Jsou charakteristické pro některé jehličnaté dřeviny. Jedná se o buňky, které shromažďují a vylučují pryskyřici. Při poranění kůry rostoucích stromů z kanálků pryskyřice vytéká, protože pro strom představuje ochrannou a impregnační funkci. [19]

### 2.2.4 Cévy

Jsou viditelné jako póry v příčném řezu a na podélných řezech jako rýhy. Jde o typické vodivé elementy listnatého dřeva. Velikost a rozmístění cév je důležitým znakem při jejich určování. Podle příčných rozměrů se póry rozlišují na makropóry ( $> 0,1$  mm) a mikropóry. Dle přítomnosti pórů a jejich lokalizace se dřeva listnáčů rozlišují na kruhovitě pórovité, polokruhovitě pórovité a roztroušeně pórovité (viz kap. 2.1.1). Nejlépe jsou viditelné u dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva. [19]

### 2.2.5 Suky

Jsou pozůstatky po živých či odumřelých větvích. Probíhají pod určitým úhlem, obvykle však nepřekročí hodnotu  $90^\circ$  od hlavní osy kmene. Suky negativně ovlivňují strukturu dřeva. Způsobují odklon letokruhů v okolí suku a vzniká závitková zóna. Tmavší barvu suků způsobují hustší letokruhy. Suky ovlivňují vlastnosti dřeva a jsou považovány za vady dřeva, v opačném případě suky pozitivně zvýrazňují přirozenou kresbu dřeva a jsou tak žádané pro výrobu nábytku a dřevěného obložení. [15]

## 2.3 Mikroskopická stavba dřeva

Dřevo se skládá z buněk, plnící různé funkce. Rozlišujeme tři typy buněk:

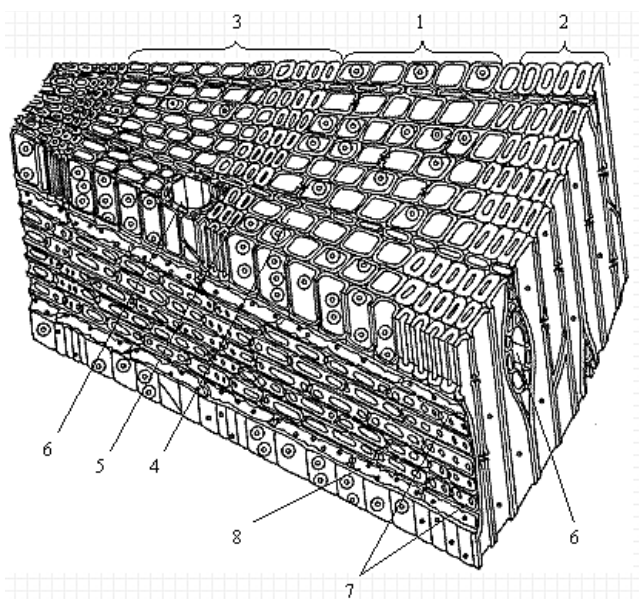
- parenchymatické buňky – vyživovací vodivé a zásobní funkce
- sklerenchymatické buňky – vyztužovací funkce,
- cévy – vodivé funkce (tracheje – pravé cévy, tracheidy – cévice). [30]

### 2.3.1 Mikroskopická stavba jehličnatých dřevin

Pro dřevo jehličnatých stromů je charakteristická jednodušší anatomická stavba dřeva (obr. č.4). Převládajícím skladebným prvkem jehličnatých dřevin jsou tracheidy, které

představují až 95% objemu dřevní hmoty. Zbývající část dřeva tvoří parenchymatické buňky.

[13]



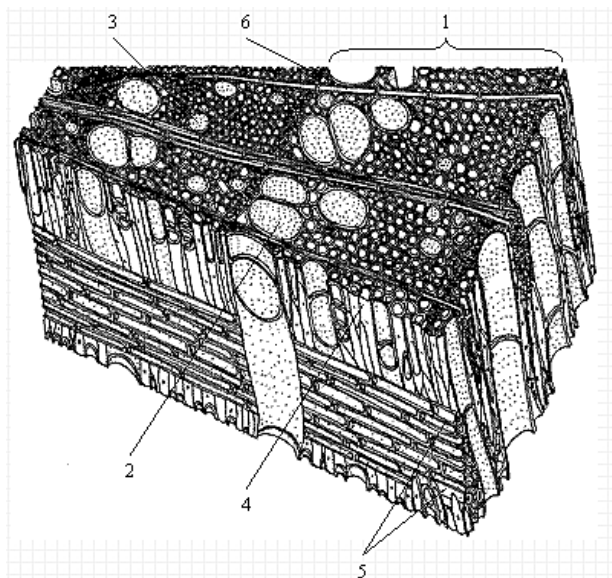
Obr. č.4: Prostorové znázornění anatomické stavby jehličnatého dřeva (borovice): 1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida. 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřevový paprsek, 8 – příčná tracheida [30]

### 2.3.2 Mikroskopická stavba listnatých dřevin

Dřevo listnatých dřevin je tvořeno různými buňkami, které jsou více specializovány a přizpůsobeny své funkci s porovnáním buněk jehličnatých dřevin. Dřevo listnáčů tvoří následující typy buněk:

- cévy (tracheje) – vodivá funkce,
- cévice (tracheidy) – vodivá a vyztužovací funkce,
- libriformní buňky (dřevní vlákna) – vyztužovací funkce,
- parenchymatické buňky – vodivá a zásobní funkce. [30]

Hlavním skladebným prvkem listnáčů jsou tracheje, které tvoří až 75% objemu dřevní hmoty. Na rozdíl od ostatních buněk, jejichž výskyt ve struktuře jednotlivých druhů dřevin je téměř všeobecný, jsou tracheje buňkami, které se vyskytují pouze u dřevin listnatých. Stavbu listnatého dřeva znázorňuje obrázek č.5. [13]



Obr. č.5: Prostorové znázornění anatomické stavby listnatého dřeva (jasan): 1 – letokruh, 2 – jarní céva, 3 – letní céva, 4 – libriformní vlákno, 5 – dřeňový paprsek, 6 – podélný parenchym. [30]

## 2.4 Vlastnosti dřeva

Dřevo má výrazně odlišné vlastnosti v různých směrech. Především vlastnosti sledované ve směru kolmém k vláknům a ve směru rovnoběžném. Ve směru kolmém k vláknům se liší vlastnosti v radiálním a tangenciálních směru. Nejlepšími parametry pevnosti i tuhosti a zároveň deformace od účinků teploty, sesychání či bobtnání disponuje dřevo ve směru rovnoběžně s vlákny. [24]

### 2.4.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

- Objemová hmotnost dřeva

Závisí na druhu dřeva a odvíjí se od množství vody ve dřevě obsaženém. S rostoucí vlhkostí vzrůstá. Objemová hmotnost dřeva v suchém stavu se pohybuje od 400 do 700 kg.m<sup>-3</sup>.

- Hustota dřeva

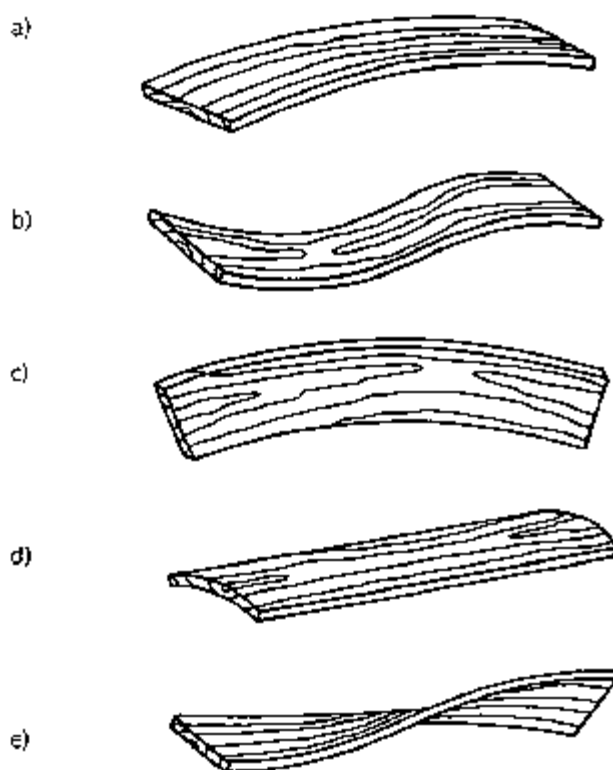
Hustota dřeva pro všechny dřeviny činí přibližně 1 500 kg.m<sup>-3</sup>. Hodnota je dána hustotou hlavních složek dřeva, kterými jsou celulóza (15 80 kg.m<sup>-3</sup>) a lignin (1 400 kg.m<sup>-3</sup>).



- Vlhkost dřeva

Je definována jako hmotnost vody ve dřevě, vyjádřená v procentech hmotnosti absolutně suchého dřeva. U přirozeně vyschlého dřeva se vlhkost dřeva mění v závislosti na teplotě a vlhkosti vzduchu. Časem nastává mezi vlhkostí dřeva, poměrnou vlhkostí vzduchu a teplotou rovnovážný stav. [16]

S vlhkostí dřeva souvisejí nežádoucí jevy jako například tvorba výsušných trhlin, sesychání a bobtnání. V důsledku anizotropie struktury dřeva vznikají výrazné rozdíly v sesychání a bobtnání dřeva v tangenciálním a radiálním směru a jsou příčinou tvarových změn řeziva (obr. č. 6, č. 7). [24]



Obr. č. 6: Zakřivení řeziva: a) podélné plošné jednoduché, b) podélné plošné složené, c) podélné boční, d) příčné, e) šroubovitě [16]



Obr. č. 7: Tvarové změny prvků: a) způsobené sesycháním, b) způsobené kroucení při vysychání, 1-tangenciální, 2-radiální, 3-mezilehlé, 4-dřeňové [16]

- Dotvarování dřeva

Dřevo je vazkopružný materiál, na jehož chování má také vliv doba trvání zatížení. Při namáhání v rámci pružného chování dřeva lze ihned, prakticky po pár minutách po dosažení odpovídajícího zatížení sledovat okamžitou deformaci. Ta bude následně narůstat v závislosti na velikosti napětí, době zatížení a vlhkosti dřeva. Po odlehčení lze zaznamenat trvalou deformaci. Zpožděná deformace – dotvarování může převýšit výchozí – pružnou deformaci a je proto normativně regulována (součinitel  $k_{\text{def}}$  záviselý na době trvání zatížení a vlhkosti). Obecně platí čím vyšší napětí a vlhkost tím větší je dotvarování. [12]

- Tepelné vlastnosti dřeva

K tepelným vlastnostem dřeva patří především tepelná vodivost a tepelná roztažnost. Tepelná vodivost je u dřeva velmi mála. Je to dáno nízkou objemovou hmotností, vyšší pórovitostí a tepelná vodivost vlastní dřevní hmoty je rovněž malá. Proto se dřevo s výhodou používá pro stavby s vyšším nárokem na energetickou náročnost stavby. Teplotní roztažnost je také malá. Z toho důvodu není nutné počítat s účinky od teplotních změn a není třeba dřevěné konstrukce dilatovat.

- Elektrické vlastnosti dřeva

Suché dřevo je velmi dobrým izolantem. Se zvyšující se vlhkostí se elektrický odpor snižuje. Měrný elektrický odpor dřeva rovněž závisí na směru vláken. V podélném směru je odpor nejmenší, ve směru příčném k vláknům se odpor zvyšuje až o dvojnásobek.

- Akustické vlastnosti dřeva

K akustickým vlastnostem dřeva se řadí např. zvuková vodivost, pohltivost a průzvučnost. Orientační zvuková vodivost v podélném směru vláken činí  $4500 \text{ m.s}^{-1}$ , ve směru napříč k vláknům pak  $1\,000 \text{ m.s}^{-1}$ . Dřevo pohltí přibližně 50% dopadající energie. Zvuková průzvučnost, jež je vyjádřena úbytkem intenzity zvuku při průchodu materiálem, činí u dřeva o tloušťce 50 mm 27 dB a u překližky tloušťky 12 mm 23 dB.

#### 2.4.2 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanickými vlastnostmi rozumíme pevnostní a pružnostní vlastnosti dřeva, zjišťující se statickými zkouškami na zkušebních tělesech dle odpovídajících norem. Tyto vlastnosti ovlivňuje několik činitelů. Např. se zvyšujícím se rozměrem konstrukčního prvku se jeho mechanické vlastnosti zhoršují. Naopak vyšší objemová hmotnost mechanické vlastnosti zlepšují. Mezi další faktory nepříznivě ovlivňující mechanické vlastnosti jsou např. vlhkost dřeva, vady dřeva (trhliny, suky, hniloba, poškození hmyzem atd.), rychlost zatěžování a doba trvání zatížení. [24]

#### 2.4.3 Trvanlivost dřeva

Dřevo je velmi náchylným materiálem a jeho ochraně je nutno věnovat patřičnou pozornost. Dřevo a materiály na bázi dřeva jsou velmi často napadeny biotickými škůdci, nejčastěji dřevokaznými houbami a hmyzem. Předpoklady k napadení škůdci je dostatečná vlhkost, kyslík, teplo, výživný substrát. Mezi škůdce, kteří nenarušují pevnostní vlastnosti dřeva, patří plísňe a dřevozbarvující houby. Způsobují nežádoucí zabarvení dřeva, ale především jsou ukazatelem zvýšené vlhkosti substrátu a tedy poukazují na vyšší riziko napadení dřevokaznými houbami a jsou předzvěstí závažnějšího poškození dřevní hmoty. Dřevo je nutno chránit pomocí vhodného přípravku již preventivně pomocí vhodné ochranné látky (nátěr, postřik, máčení, injektáž) beztlakově respektive metodou tlakovou, kdy je dřevo napuštěno do větší hloubky. [15]

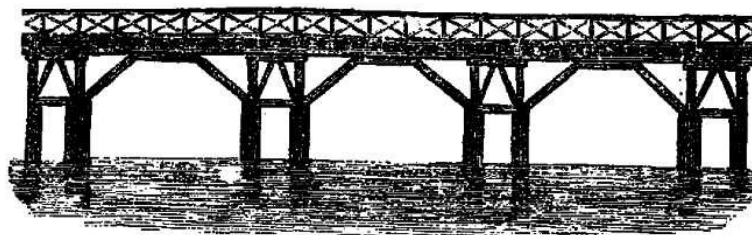
### 3 Historický vývoj lávek

Stavba mostů znamenala důležitý mezník v historii lidstva. Dodnes jsou mosty v přeneseném slova smyslu i symbolem pro sbližování národů, pro zmenšení vzdáleností i mezi obyčejnými lidmi. Již od pradávna mají lidé potřebu komunikovat, objevovat, sdružovat se, překonávat překážky. V důsledku těchto potřeb docházelo k rozvoji obchodu a dopravy. Zcela prvními „mosty“ byly kmeny stromů spadlých přes vodní hladinu. Později toho člověk využil pro výstavbu vlastního přemostění z kmenů záměrně poražených stromů. Vznikaly tak primitivní lávky postavené z lehce dostupných přírodních materiálů, jako je právě dřevo či kámen. V některých oblastech byly lehce dostupným materiálem tzv. liány, z nichž se rovněž svazovaly primitivní konstrukce umožňující přechod přes vodní hladinu suchou nohou. Později díky novým poznatkům, objevování nových materiálů, rozvoji dokonalejších nástrojů a novým nápadům se postupně z primitivních staveb vyvinuly složitější konstrukce.

V této kapitole si představíme několik ukázek historických mostů od prvopočátků po současnost.

#### 3.1 Starověk

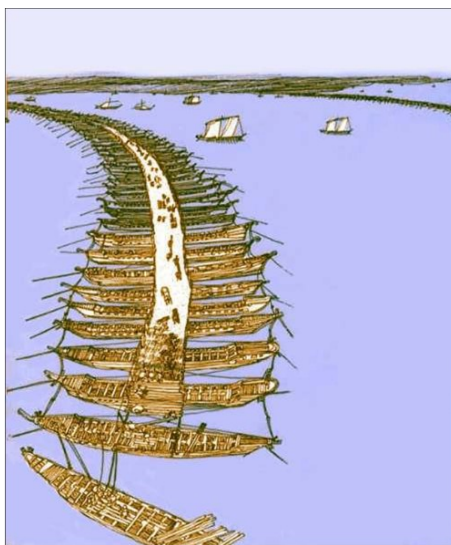
Mezi nejstarší historicky doložené most patří most Pons Sublicius přes Tiberu v Římě (obr. č. 8). Byl postaven v roce 625 př. n. l. a jako autor je uváděn Ancus Marcius. Na pilotách se stativem byly uloženy podélné trámy a mostovka. Koncem 16. Století, v roce 1570 vydal italský architekt Antonio Palladio publikaci, v které se zamýšlí i nad stavbou tohoto mostu. Uvádí v ní, že vůbec prvním mostem, který kdy byl postaven přes Tiberu, byl vybudován Herkulesem a nazván Svatým mostem. Byl situován v místě, kde později král Ancus Marcius vytvořil most Sublicius, který byl podobně celý ze dřeva a jeho trámy byly spojeny s takovou dovedností, že se mohly zdvihnout a uložit dle potřeby. Dále se zmiňuje, že nebylo použito ani železa, ani hřebíků. Neví se, jak byl udělán, jen spisovatelé říkají, že byl udělán na tlustých dřevech, která podporovala jiná. Proto byl nazván Sublicius, protože taková dřeva se v řeči Volsků nazývala sublicies.



*Obr. č. 8: Most Pons Publicius přes Tiberu v říši [38]*

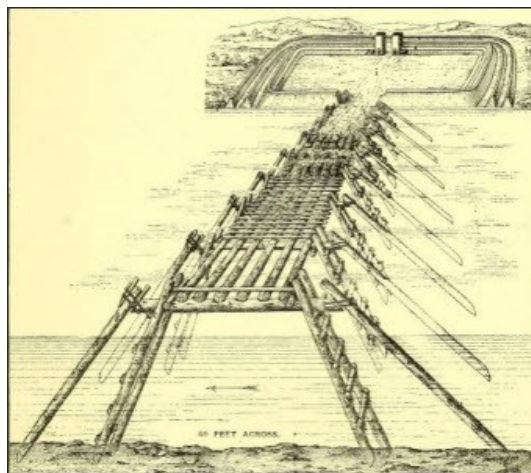
Dle svědectví Herodotova dila postavili Peršané kolem r. 604 př. n. l. přes řeku Eufrat v Babyloně mohutný dřevěný most na kamenných pilířích. Jeho délka byla 300 m a jednotlivá pole měla světlost 9 m. Pilíře byly z cihel, obložené kameny, na nich pak dřevěná konstrukce z cedrových trámů. Pilíře byly již zašpičatělé proti proudu, aby odolávaly plovoucím předmětům. Na druhé straně byly pilíře zaoblené. Tato úprava se používá prakticky dodnes.

Peršané užívali mosty loďové pro své výboje, které samozřejmě rovněž nejsou dochovány. Ale je doloženo, že perský vládce Dareios kolem roku 513 př. n. l. přikázal postavit pontový most přes Bosporskou úžinu. Perský pontonový most je nepochybně významný tím, že skutečný tvůrce není skryt pod jménem panovníka. Tvůrcem byl významný samský stavitel Mandroklés. Dareios nechal později postavit další most i přes Dunaj, který pro něj postavili spojenci maloasijských Řekové. Známý je i rozkaz postavit podobný most přes Helléspont v r. 480 př. n. l. od Dareiova syna Xerxése. Princip pontonového mostu je znázorněn na obr. č. 9.



*Obr. č. 9: Pontonový most vládce Xerxése [37]*

Dá se předpokládat, že dnes známé římské mosty byly nejdříve dřevěné, teprve později byly klenuty z kamene. Literární i grafické záznamy zmiňují tzv. Caesarův most přes Rýn (obr. č. 10) postavený v letech 53 až 55 let před Kristem při pronikání římských legií do střední Evropy. Byl popsán samotným Caesarem v jeho pamětech o válce Galské. Jeho stavba trvala pouhých deset dní.



*Obr. č. 10: Caesarův most přes Rýn postavený za 10 dní [39]*

Další historicky doložený dřevěný most starověkého Říma stál u Oršové v soutěsce Železná vrata na Dunaji. Jednalo se o vzpěradlovou dřevěnou konstrukci na kamenných pilířích a byla pravděpodobně postavena v letech 103 až 105 našeho letopočtu. Most měl délku asi 1 000 m a měl patrně 20 polí o rozpětí 35 m. Zděné pilíře mohly být široké 18 m a vysoké až 45m. Stavitelem byl údajně Apollodor z Damašku. Přibližná podoba mostu je zobrazena v reliéfu na Trajánově sloupu v Římě viz obr. č. 11. [25]



*Obr. č. 11: Reliéf na Trajánově sloupu zobrazující most přes Dunaj[40]*

## 3.2 Středověk

Po pádu Říše římské nastává velký úpadek při stavbě mostů. Ke změně dochází až se zakládáním a rozvojem měst ve 12. století. Staré římské komunikace se tedy začaly obnovovat, nové mosty se stavěly na troskách mostů římských. Most ztrácel funkci pouhého spojení mezi dvěma břehy, spíše nabývala na významu funkce obrany a opevnění. Trasa nových středověkých mostů byla tedy často zalomená, vozovka byla úzká, často přerušená pohyblivým, padacím, u něhož musela potom být z technických, ale i obranných důvodů alespoň brána či věž. Ze známých důvodů nebylo příliš dřevěných mostů z tohoto období zachováno. Rozšířenějším materiálem v tomto období byl především kámen.

I na našem území vznikaly v té době dřevěné mosty. Dle kronikáře Václava Hájka z Libočan byl přes Vltavu v Praze postaven první dřevěný most z roku 795, byl ale záhy zbořen.

Přibližně v místech dnešního Karlova mostu stál kdysi další dřevěný most, o němž je krátká zmínka v Kosmově kronice, že byl roku 1118 velkou povodní stržen. [25]

V areálu slovanských sídlišť v jihomoravských Mikulčicích byly odkryty základy jedenácti kostelů a s nimi rovněž zbytky mnoha desítek dřevěných kůlů, které nesly nad příkopem hradištní most zakončený v palisádě mostní branou. Podle nakupení kůlů lze rovněž usuzovat, že uprostřed mostovky bývala další, střední pevnostní branka. V okolí mostu se našly válečné sekery. Z toho odborníci usuzují, že se v okolí mostu nebo přímo na něm bojovalo. Studenti brněnské stavební fakulty VUT zhotovili rekonstruovaný model této hradištní mostní stavby. [43]

Starší dřevěné mosty známe jen z písemných dokladů, kde se zachoval jejich popis, který případně poskytl podnět pro jeho pozdější grafickou či modelovou rekonstrukci. Konstrukce tehdejších mostů byly buď zcela dřevěná na pilotových barkách nebo spočívaly na kamenných pilířích a velmi často byly zastřešené.

### 3.2.1 Kaplový most

Reprezentantem takovýchto krytých mostů je Švýcarský 222 metrů dlouhý dřevěný most v městě Luzernu přes řeku Reuss (obr. č. 12). Původní most, nazývaný Kapallbrücke, byl postaven roku 1333, ale byl v průběhu času pochopitelně mnohokrát obnovován.



Naposled byl obnoven v roce 1933, kdy byla část konstrukce zasažena požárem. Dřevěná tesařsky vázaná konstrukce krytého mostu plní v Luzernu podobnou funkci jako v Praze most Karlův. [25]



*Obr. č. 12: Krytý most Kapallbrücke v Luzernu [41]*

### 3.2.2 Radošovský most

Reprezentantem krytého mostu v ČR je radošovský most přes Ohři a byl postaven na brodu v místech, kudy král Jan Lucemburský prvně přijel do Čech. Jeho syn, císař Karel IV. udělil v roce 1364 městu Ostrovu nad Ohří právo k vybudování mostu. Věšadlový dřevěný most na dvou kamenných pilířích z lomového kamene bohužel několikrát vyhořel. Byl však vždy obnoven. V roce 1986 ho zasáhl poslední požár a existence mostu byla ukončena. V roce 2003 byl však most znovu postaven v jeho historické podobě (obr. č. 13). [42]



*Obr. č. 13: Historický vs. soudobý most v Radošově [42]*

### 3.2.3 Zvedací mosty

V období středověku také vzrostl počet hradů. Padací resp. zvedací mosty zaujaly významnou roli ve funkci obrany. Blokoval vstup nežádoucím návštěvníkům. Znamým



příkladem je stěžežkový most pevnosti Ponta de Bandeira v Portugalsku ve městě Lagos (obr. č. 14).



*Obr. č. 14: Zvedací most pevnosti Ponta de Badeira v Portugalsku [44]*

Ve 14. století se začaly budovat i mechanické zvedací mosty přes splavné vodní toky. Jeden takový most inspiroval impresionistického malíře Vincenta van Gogha a byl základním motivem jeho obrazu. Jedná se o most Le Pont de Langlois v Arles ve Francii (obr. č. 15). [25]

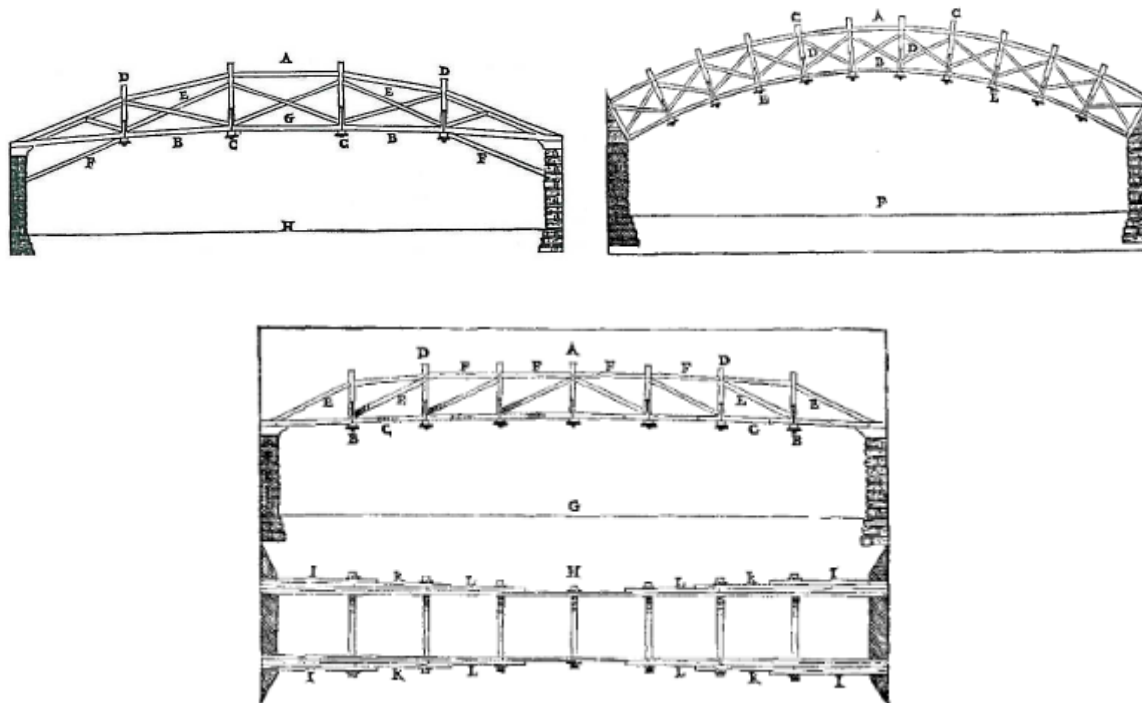


*Obr. č. 15: Goghův obraz Most v Arles [25]*

### **3.2.4 Mosty Andrey Palladia**

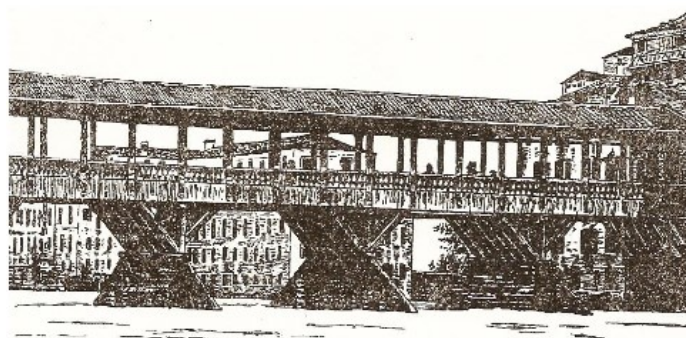
Od 15. Století se v Evropě objevují i první teoretické práce z oblasti stavby mostů, především z pera italských architektů a stavitelů, např. Leona Battisty Albertiho a Andrey Palladia. Jejich návrh sloužily jako vzor pro architekturu mostů, a nejen mostů, až do konce 18. století. Andrea Palladio navrhl celou řadu typologických konstrukcí mostů. Např. jeden z jeho teoretických návrhů dřevěného mostu má vzestupně tlačené diagonály a spodní pásy

jsou postupně od středu k opěrám zesilovány, jiný návrh zase využívá obloukového účinku horního pásu hlavního nosníku se vzpěradlem při opěrách. Ukázky jeho návrhů jsou vyobrazeny na obr. č. 16. [25]



Obr. č. 16: Příklady Palladiových návrhů dřevěných mostů [25],[45]

Prvním mostem, který Andrea Palladio stavěl je most Ponte degli Alpini (most Horských střelců) přes řeku Brenta v Italském Bassanu. Jedná se o krytý dřevěný pontonový most z roku 1569, původně nazýván Proto vecchio (Starý most). V roce 1748 toto dílo zničila záplava. Pár let později jej znovu postavil Bartolomero Ferracina. [46]



Obr. č. 17: Most Ponte degli Alpini v italském Bassano del Grappa [47]

### 3.3 Novověk

Téměř do konce 17. století se mosty stavěly podle citu bez složitých výpočtů a podle zkušeností předávaných z generace na generaci. Výrazný pokrok v mostním stavitelství nastává díky prohlubování poznatků v oblasti teorie konstrukcí, jejíž základy stojí na četných objevech v matematice, fyzice a mechanice (Leonardo da Vinci, Galileo Galilei, Bernoulli, Varignon, Euler, Lagrange, Hooke, Navier a další). [47]

#### 3.3.1 Most Kintai

Most Kintai česky nazývaný Brokátový pás se nachází v Japonsku. Jeho pět dřevěných oblouků o rozpětí 35 m se klene přes řeku Nišiki (obr. č. 18). Podporami oblouků jsou mohutné kamenné pilíře. Celková délka mostu je 193,3 m, šířka lávky činí 5m. Původní most byl dokončen roku 1673. Byl však stržen povodní způsobená tajfunem v roce 1950 a v roce 1953 byl most nahrazen přesnou kopií. Tato unikátní dřevěná lávka je sestavena bez použití jediného hřebíku (obr. č. 19). [35]



*Obr. č. 18: Most Kintai - Japonsko[34]*



*Obr. č. 19 Detail mostu Kintai: spoje bez užití hřebíků[34]*

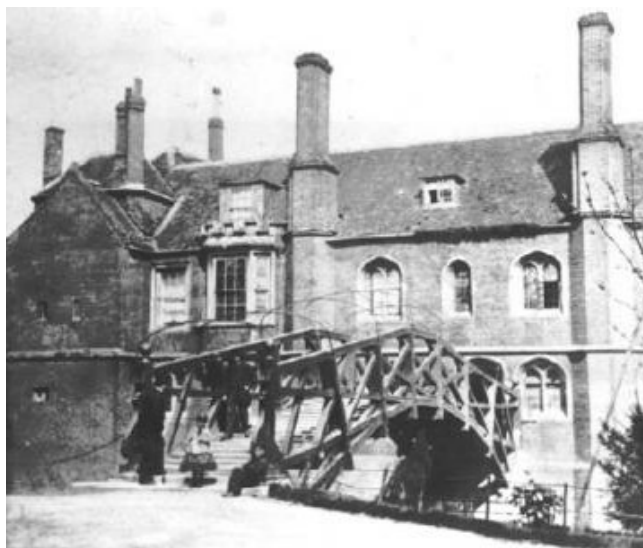
### 3.3.2 Matematický most

Matematický most navržený architektem Williamem Etheridge je lidový název pro dřevěný most přes řeku Cam v Cambridge (Anglie). Mostu se říká matematický pro jeho zábradlí z velké počtu mnohoúhelníků tvořící velmi pevnou konstrukci. Oficiálně se nazývá Dřevěný most. Byl postaven v roce 1749 tesařem Jamesem Essexem mladším (obr. č. 21). Most vznikl pod vlivem Palladiovy návrhy příhradových mostů, které uvedl ve svých čtyřech knihách o architektuře. V letech 1845 a 1905 byl zbourán a opětovně postaven v nezměněné podobě (obr. č. 20). [36]



*Obr. č. 20 Matematický most z roku 1905 přes řeku Cam v Cambridge [36]*





*Obr. č. 21: Původní matematický most přes řeku Cam v Cambridge [36]*

### 3.3.3 Walton bridge

Starý Walton bridge byl navržen rovněž Williamem Etheridge. Tento most byl obdivován pro svou pevnost a pozoruhodně velký oblouk. Byl inspirací italského malíře Giovannyho Canaletty, který zvěčnil most v roce 1755 (obr. č. 22). Konstrukce tohoto obdivuhodného mostu však neměla dlouhého trvání v důsledku napadení dřevokaznými škůdci a v roce 1783 byla demolována. [36]

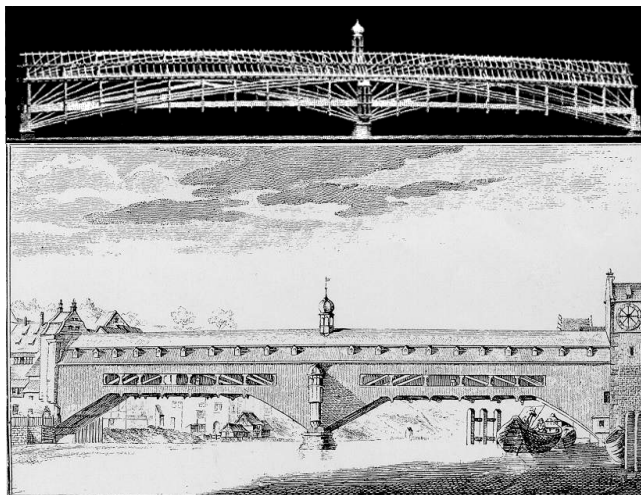


*Obr. č. 22: Obraz mostu Giovannyho Canaletty[36]*

### 3.3.4 Most v Schaffhausenu

Ze švýcarských stavitelů vynikal ve výstavbě dřevěných mostů Ulrich Grubenmann z Teufennu. Jeho dílem je např. most z roku 1757 přes Rýn v Schaffhausenu. Původně stavitel navrhl most jako prostý nosník o rozpětí 119 m, byl však donucen příslušníky města přidat středu rozpětí podporu. Po dokončení mostu však odstranil podkladní prvky nad pilířem a tak

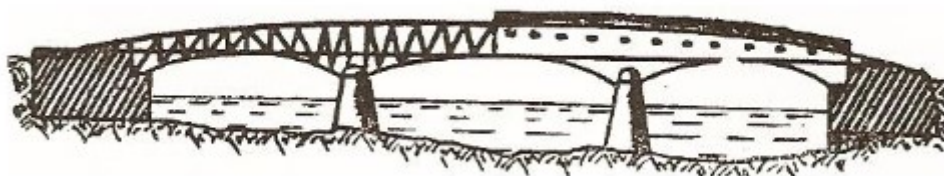
demonstroval, že jeho původní návrh je správný. Konstrukce mostu a jeho podoba je patrná z obr. č. 23. [49]



Obr. č. 23: Grubenmannův most v Schaffhausenu [45],[48]

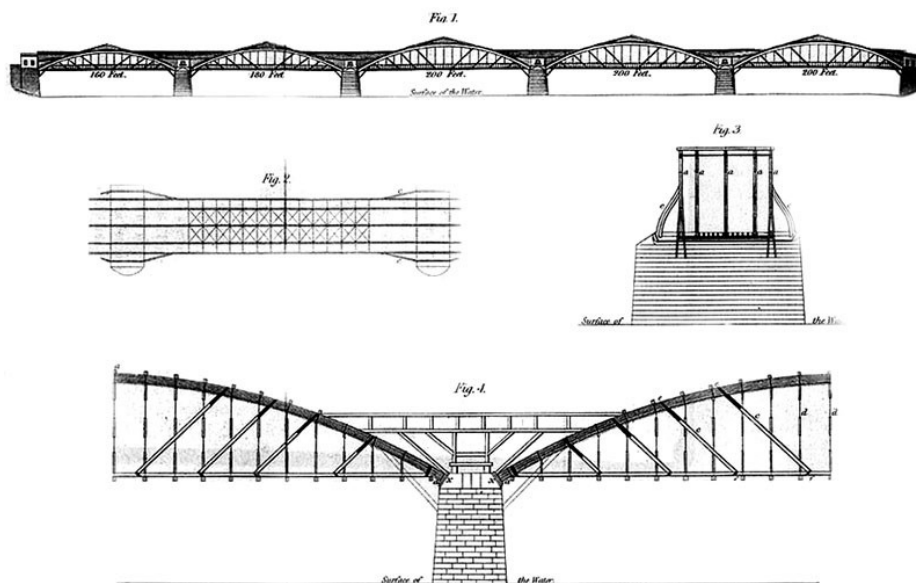
### 3.3.5 Železniční mosty v USA

V 19. století se výrazný vývoj dřevěných mostů odehrával v USA při rozsáhlé výstavbě železničních tratí. Američané jako první uskutečnili myšlenku příhradových obloukových dřevěných mostů. V roce 1804 až 1806 postavil Timothy Palmer most přes Schuylkill ve Filadelfii (obr. č. 24 ). Jednalo se o konstrukci příhradových oblouků s přímými horními pásy na rozpětí 103 m.



Obr. č. 24: Most přes Schuylkill ve Filadelfii [47]

Američan Burr použil v roce 1804 pro železniční most přemostňující Delevar u Trentonu obloukovou konstrukci nesoucí mostovku pomocí železných táhel. Oblouk byl ztužen šikmými příčkami. Jedná se o most o pěti polích s rozpětí 49 až 61 m a je vyobrazen na obr. č. 25.



Obr. č. 25: Most přes Delevar u Trentonu [50]

Vezmeme-li v úvahu, že američtí inženýři ještě tenkrát neznali všechny teorie dneška, musíme obdivovat jejich odvahu k stavbě tak velkých a složitých mostů. Vždyť v Americe během stavby železnic byly přemostěny všechny veletoky jako Mississippi, Missouri a další. [47]

### 3.4 Moderní mosty

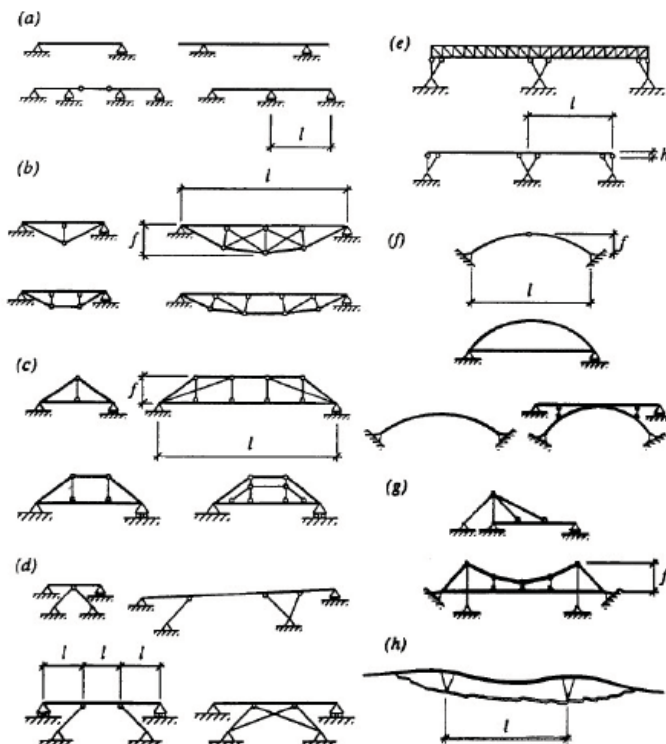
Po nástupu ocelových a betonových mostů byly dřevěné konstrukce lávek a mostů spíše pouze provizorní a pomocné. S vývojem spojovacích prostředků a ochranných látek proti biotickým škůdcům se oživil zájem i o konstrukce definitivní a to zejména v zemích bohaté na lesní porosty. V současné době se s výhodou využívá pro stavbu dřevěných mostů lepeného lamelového dřeva. Lze z něj vyrábět nosníky neomezených velikostí a tvarů a disponují lepšími mechanickými vlastnostmi. V mostních stavbách je dřevo využíváno zejména pro lávky pro pěší, zvláště pak v přírodním prostředí. [47]

V dnešní době existuje nespočet dřevěných mostů a lávek. Proto si v následující kapitole představíme základní konstrukční systémy vždy s jedním příkladem soudobé konstrukce.

## 4 Konstrukční systémy lávek

Dle konstrukčního systému lze lávky a samozřejmě i mosty rozdělit do kategorie dřevobetonových deskových respektive trámových lávek, trámových systémů o jednom a více polích, dále vřadlových, vzpěradlových, rámových, obloukových, zavěšených nebo též visutých konstrukčních systémů. Další zajímavou variantou jsou konstrukce ve tvaru řetězovky. Statická schémata jednotlivých systémů jsou vykresleny na obr. č. 26. Moderním materiálem pro výstavbu mostů je lepené lamelové dřevo, které má lepší užitné vlastnosti než dřevo rostlé. Navíc lze vyrobit nosníky téměř neomezených rozměrů a tvarů. Výrobou LLD lze eliminovat přírodní charakter rostlého dřeva označované jako vady dřeva. Důležitou roli ve výstavbě mostních konstrukcí hraje jejich životnost. Je nutné konstrukci, zvláště pak dřevěnou, jež je náchylná na biotické činitele a vlivy venkovního prostředí řádně chránit proti těmto negativně působícím vlivům. Konstrukci je nutné opakovaně impregnovat, chránit proti vlhkosti např. správným návrhem spojů, kontrolovat v časově rozumných intervalech stav konstrukce a dbát na řádnou údržbu. Jedině tak, lze dřevěnou konstrukci vystavenou agresivním atmosférickým vlivům udržovat v použitelném stavu po relativně dlouhou dobu. Použitím vhodného konstrukčního systému pro lávku s předem určenými parametry a požadavky lze docílit hospodárného řešení.





Obr. č. 26: Statické systémy lávek: a)trémové, b)vzpěradla, c)věšadla, d)rámové systémy, e)příhradové nosníky, f)obloukové systémy, g) zavěšené a visuté konstrukce, h) řetězové systémy, [26]

#### 4.1 Dřevobetonové deskové/trémové lávky

Jedná se o novodobý systém využívající výhodné vlastnosti betonu v tlaku. Zároveň však potlačuje nepříliš příznivé vlastnosti betonu v tahu. Tahové síly přebírají buďto dřevěné lepené lamelové trámy nebo desky. Spolupůsobení je zajištěno spřažením mezi betonem a dřevem. Konečná konstrukční výška konstrukcí dřevobetonových lávek je velmi malá. Např. u deskové lávky přes potok v Kaylu v Lucemburksu s rozpětím 9,7 m a šířkou 4 m je celková konstrukční výška lávky pouhých 340 mm. Na obr. č. 27 je ukázka dřevobetonové konstrukce lávky, která je určena také pro silniční dopravu do 3,5 tuny. Rozpětí činí 17,6 m, šířka 3,92 m. Dřevěné lepené trámy jsou s betonovou deskou tloušťky 20 cm spojeny pomocí dvou řad spřažení HBV systému. [51]



*Obr. č. 27: Lávka v Purkersdorfu u Vídně [51]*

## 4.2 Trámové lávky

U trámových lávek tvoří nosnou konstrukci hlavní podélné nosníky plné nebo příhradové. Je to nejčastější konstrukční řešení lávek z důvodu jednoduchosti návrhu, výroby a montáže. Obvyklé rozpětí pro trámové lávky je 5 až 30 m. Ze statického hlediska jsou prosté nosníky používány pro kratší rozpětí, pro rozpětí větší jsou výhodnější nosníky spojitě. Nejčastěji bývají používány trámy z LLD pro své výhodné mechanické a užitné vlastnosti a v neposlední řadě lze u nich uplatnit nadvýšení.

Jako ukázkou lze předvést most přes řeku Drôme ve městě Crest ve Francii na obr. č. 28. Délka nosné konstrukce činí 93 m. Nosnou funkci plní čtyři lepené lamelové trámové nosníky, ztužené příčnými příhradovými nosníky. Trámy jsou elegantně nadvýšeny a mnohonásobně podepřeny vidlicovým systémem spodní stavbu, založenou na pilotách. Most o třech polích překrývá impregnovaná podlaha vozovky, na které je dvouvrstvá izolace z SBS modifikovaných pásů, celoplošně natavených. [53]



*Obr. č. 28: Trámový most přes řeku Drôme ve Francii [52]*

### 4.3 Příhradové lávky

Příhradové lávky jsou vhodná pro větší rozpětí (20 až 40m) a také vyšší zatížení. Mohou mít mostovku umístěnou v dolní, horní respektive mezilehlé části hlavních nosníků. Volba umístění mostovky závisí na prostorových požadavcích. Varianty s dolní mostovkou mívají problém se stabilitou horních pásů. Proto se aplikují vnější šikmé vzpěry kotvené na prodloužených příčnicích pro zlepšení stability horních pásů. Horní mostovku lze uplatnit tam, kde se nekladou vysoké požadavky na volný prostor pod lávkou či mostem. V současnosti se uplatňují příhradové nosníky různých tvarů (zaoblení horních resp. dolních pásů). Časté jsou i obloukové příhradové nosníky. Výhodou je možnost vysokého stupně prefabrikace a tedy velmi rychlá výstavba. Nevýhodou je vyšší náročnost na dílenské zpracování a řešení styčnickových spojů.

Příkladem je dřevěná lávka přes řeku Placer River na Aljašce na obr. č. 29. Jedná se o obloukovou příhradovou konstrukci s rozpětí 85,3 m navržená firmou Western Wood Structures. Vzhledem k blízkosti ledovce Spencer Glacier musí být lávka umístěna dostatečně vysoko, aby se vyloučila možnost kolize s ledovými krami. Proto konstrukce nemá ani vnitřní podporu. Šířka konstrukce je 4,5 m. šířka chodníku 1,8 m. Výška obloukových příhradových nosníků na koncích je 4,6 m a uprostřed rozpětí 8,2 m. Konstrukce je na koncích podepřena pilotovými bárkami, piloty zasahují do země asi 12 m do země. Vzhledem k velmi krátké době (3 až 4 měsíce) vhodné k provádění trvala montáž konstrukce tři letní období a byla dokončena roku 2013. [54]



*Obr. č. 29: Dřevěná oblouková příhradová lávka přes řeku Placer River na Aljašce [54]*

#### 4.4 Věšadlové, vzpěradlové a vzpínadlové systémy

Věšadlo je typ nosné konstrukce, které se používá ke zvýšení únosnosti vodorovného nosného prvku, zejména pak u střešních a mostních konstrukcí. Účelem věšadla je vynesení hlavního trámu a přenesení sil od zatížení do podporové konstrukce. Obrátíme – li věšadlový systém, prakticky se jedná o vzpínadlo. Příkladem věšadlové konstrukce je lávka na obr. č. 30 v turistické oblasti Hřčava v místě Trojmezí, kde se střetávají hranice třech států. České republiky, Polska a Slovenska. Nosnou konstrukci lávky tvoří dva hlavní nosníky věšadlového typu o rozpětí 18,0 m s maximální konstrukční výškou 4,10 m. Ve styčnicích jsou spojené dvojicí příčných trámů. Na příčných trámech spojující věšadlové nosníky jsou uloženy příhradové podélníky o výšce 1,60 m. Na nich spočívají příčníky z dvojic trámů 80/160 mm a mostovka je provedená z fošen tloušťky 50 mm. Stabilitu horního pásu věšadla zajišťují vnější vzpěrky.

Staticky se jedná o prostě uloženou konstrukci věšadla s vloženou příhradovou konstrukcí se spodní mostovkou. Tímto uspořádáním je zatížení přenášeno z příhradových podélníků na věšadlo (hlavní nosník) pouze silami ve styčnicích věšadla. Toto řešení zjednodušilo výstavbu v náročném terénu. [55]



Obr. č. 30: Věšadlová lávka u Trojmezí v turistické oblasti Hřčava v Beskydech [55]

Vzpěradlem se rozumí konstrukce podpírající hlavní nosné prvky. Šikmé vzpěry podpírající nosný systém v jednom či více bodech zkracují rozpětí nosných trámů. Šikmé vzpěry nezasahují do překonávané překážky, jak by tomu bylo u svislých podpěr. Vzpěradlovým systémem lze překonat větší rozpětí nebo přenést vyšší zatížení. Příkladem je



dřevěná lávka z obr. č. 31, která je turistickým přechodem přes hraniční řeku Jizeru a byl pro turisty otevřen v červenci roku 2005. [56]



*Obr. č. 31: Karlovský most jako jizerskohorský turistický hraniční přechod [56]*

Pro konstrukci samotného vzpínadla se běžně pro dřevěné lávky používá ocelových tyčových prvků, přenášející tah. Příkladem takové vzpínadlové lávky je pozorovací lávka u Lučních rybníků v Karlových Varech z obr. č. 32. Jedná se o mnoha pólovou dřevo-ocelovou lávku o délce 505 m a šířce 1,5 m. Pole jsou prostá. Nosnou konstrukci 10ti metrových polí tvoří vzpínadlo s ocelovým táhlem a jedním středovým sloupkem. Čtyři dřevěné nosníky jsou rozděleny na dvě dvojice, z nichž každá dvojice tvoří jedno vzpínadlo. Nosníky se vzpínadlem jsou uloženy na ocelových příčnicích, které jsou součástí tuhé dřevěné čtyřsloupkové podpěry a je možné je rektifikovat. [57]



*Obr. č. 32: Pozorovací lávka v Lázeňských lesích u Karlových Varů [57]*

## 4.5 Oblouky

Oblouková konstrukce je výhodná ze statického hlediska pro rovnoměrně rozložené zatížení, kdy konstrukce je výhradně tlačená. Ve skutečnosti však dochází k nerovnoměrnému rozložení a část zatížení je tak přenášena ohybovým momentem. Pro maximální funkčnost je nutné zvolit správný tvar oblouku, který bývá nejčastěji parabolický či kruhový. Nevýhodou obloukové konstrukce jsou vyšší vodorovné podporové reakce. Proto bývá často aplikováno táhlo v oblasti podpor, pro zachycení těchto vodorovných sil. Obloukové soustavy na bázi dřeva se navrhují jako dvojklobové nebo trojklobové. Jako příklad obloukové lávky se spodní mostovkou zde uvádím novou lávku na Šumavě (obr. č. 33) nedaleko Černého Kříže přes Studenou Vltavu zvyšující turistický komfort. Jedná se o nejdelší dřevěnou lávku tohoto typu v ČR. Její rozpětí činí 36 m, šířka je 2 m. Lávka je z lepeného lamelového dřeva. Oblouk a dřevěné táhlo spojují ocelové závěsy Pfeifer. Mostovka je tvořena z ocelových příčníků, podélných dřevěných hranolů, na nichž leží dubové fošny – mostovky. [59]



*Obr. č. 33: Oblouková lávka na Šumavě [58]*

## 4.6 Zavěšené mosty

Zavěšené mosty a lávky spolu s visutými se používají pro překlenutí větších rozpětí. Hlavní nosnou konstrukce je tvořena většinou ocelovým či dřevěným pylonem, na němž jsou kotvena ocelová táhla (závěsy), která nesou nosnou konstrukci mostovky. Důležitou roli u těchto systémů hraje dostatečná příčná tuhost konstrukce, protože dynamická odezva na klimatická i užitná zatížení je často problémová. Nepříznivé kmitání a průhyby lze zlepšit

kromě dostatečného příčného ztužení i zabudováním. Jako příklad tohoto systému v ČR lze uvést lávku přes silnici I. třídy E50 u známého motorestu Samota (obr. č. 34). Délka lávky je cca 38 metrů a je uložena na ocelových ložiscích a zavěšena na ocelových táhlech. Pylon je také ocelový. Dřevěné prvky jsou z lepeného, lamelového dřeva. [60]



Obr. č. 34: Lávka přes I/E50 u motorestu Samota [60]

## 4.7 Visuté mosty

Jak už bylo řečeno výše, visuté systémy lávek a mostů se používají pro větší rozpětí. I tyto lávky mají problém s dynamickou odezvou a je proto nutné věnovat zvýšenou pozornost příčnému ztužení lávky. Základními nosnými prvky jsou dva pylony, mezi nimiž jsou ukotvena lana, které pomocí dalších svislých lan nesou nosnou konstrukci mostovky.

Příkladem je známá Benešovská visutá lávka u Semil přes řeku Jizeru o délce 226 m při šířce mostovky 2 m. Jako další příklad lze uvést visutou lávku v Lokti v Zahradní ulici na obr. č. 35. Nosnou konstrukci tvoří dva ocelová lana vedená přes sedla dvou nízkých pylonů ukotvená do opěr. Rozpětí lávky je 32,6 m. [61]





Obr. č. 35: Visutá lávka v Lokti v Zahradní ulici [61]

#### 4.8 Mosty ve tvaru řetězovky (lanové)

Tvar řetězovky vidíme často kolem sebe. Například tento tvar zaujmou elektrické dráty (zvláště jsou-li sloupy daleko od sebe a na drátech je námraza). Stejný tvar zaujmou mosty, které mají hmotnost rozloženou podél délky. Příkladem konstrukce lávky ve tvaru řetězovky je lávka Rádlo u Jablonce nad Nisou z obr. č. 36. Hlavní nosníky jsou z LLD ve tvaru řetězovky a jsou podporovány dvojicí nosných lan kotvených do skalního masivu. Podporujícím prvkem je i střední pilíř ve formě kyvné stojky. Vlastní tíhou nosné konstrukce jsou lana napnuta a zformována do tvaru řetězovky. Délka mostu činí 58,5 m, šířka pak 3,8 m. [62]



Obr. č. 36: Lávka Rádlo u Jablonce nad Nisou [62]



## 5 Stezka ve stromech

V současné době je zaznamenáván vysoký trend ve výstavbě stezek korunami stromů jak ve světě, tak v ČR. Není divu. Je velmi oblíbenou součástí volnočasové aktivity velkého počtu obyvatel. Kde jinde by člověk našel lepší aktivní relaxaci a klid v dnešní uspěchané době, než v těsném kontaktu s přírodou v horském prostředí a navíc s tak krásným výhledem. Procházka stezkou v korunách stromů Vás dostane do jiného světa a stává se tak jedním z nejnavštěvovanějších turistických cílů. Zadáním diplomové práce je návrh konstrukčního systému a posouzení lávky stezky korunami stromů a proto jsou v následující kapitole uvedeny některé již realizované stezky. Obsahem další podkapitoly je seznámení se vstupem pro výpočet.

### 5.1 Realizované stezky

#### 5.1.1 Stezka korunami stromů na Kramolíně u Lipna

Tato stezka je 675 m dlouhá stezka na vrchu Kramolín u Lipna nad Vltavou s několika adrenalinovými a didaktickými prvky s vyhlídkovou věží a nejdelším suchým tobogánem v ČR. Stezka byla vybudována v roce 2012 a je vůbec první stezkou v našem státě. Její podobu navrhl německý architekt Josef Stöger, který navrhl i první a nejdelší stezku na světě v Národním parku Bavorský les.

Celá stezka je podpírána 75 sloupy, dřevěná lávka stoupá směrem k vyhlídkové věži mezi korunami smíšeného lesa až do výšky cca 25 m nad zemí. Na první vyhlídkové patro vede točitá lávka až do výšky 37 m. Na vrchol věže (40 m nad zemí) se lze dostat pomocí krátkého schodiště. Při krásném počasí lze z vyhlídky zpozorovat i Alpy. [64]

Nosná konstrukce dřevěných lávek je ze dvou hlavních nosníků z lepeného lamelového dřeva o rozpětí přibližně 24 m. V třetinách rozpětí jsou nosníky podporovány příčnými ocelovými nosníky uloženými na šikmém dřevěném sloupu a ocelových vzpěrách. Konstrukce mostovky je z ocelových příčníků, které jsou ztuženy křížem orientovanými táhly a z dřevěného podélníku uprostřed šířky lávky. Na podélníku a hlavních trámech pak spočívá samotná mostovka z dřevěných fošen. Podpory jsou z hrubě opracovaných kmenů stromů protkané ocelovými táhly a dřevěným ztužením, zamezující vybočení kmenů v důsledku vzpěrného tlaku. Konstrukce je patrná z obrázku 65, na kterém je zachycena stezka v průběhu výstavby.

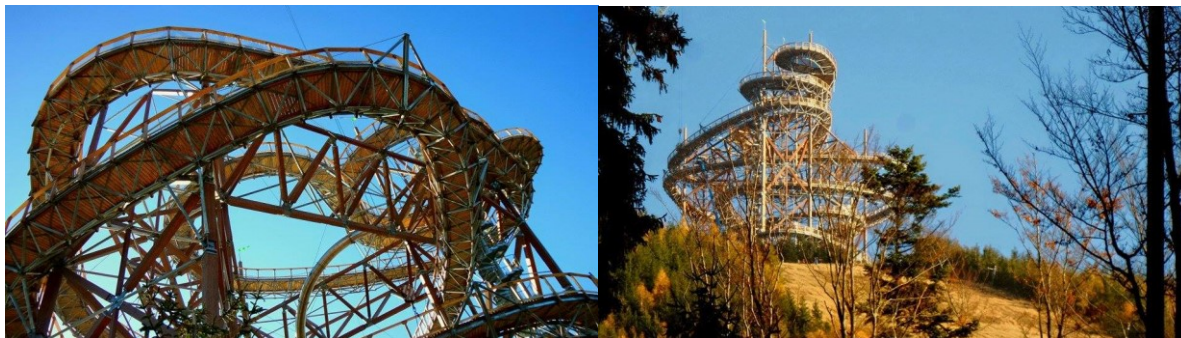


*Obr. č. 37: Stezka korunami stromů u Lipna nad Vltavou v průběhu výstavby [63]*

### **5.1.2 Stezka v oblacích v Dolní Moravě pod Králickým Sněžníkem**

Na kopci nad sjezdovkou v Dolní Moravě roste od července tohoto roku nová unikátní stezka v ČR. Stezku v oblacích bude tvořit spleť protínajících se cest s vyhlídkou. Na vrchol nepovede pouze jedna stezka ale několik cest v různých úrovních, které se budou proplétat a míjet. Z vrcholu je možné obdivovat nedaleký Králický Sněžník, ale i Orlické hory a při dobrém počasí i Sněžka. Dřevěnou stavbu navrhl známý brněnský architekt a vysokoškolský pedagog Zdeněk Fránek. Tvar věže má imitovat let nočního motýla, konstrukce je nepravidelná s přírodní strukturou a je pojata abstraktivně. Vyhlídková plošina je 45 m nad zemí. Ti odvážní mohou pro cestu zpět na zem zvolit 101 metrů dlouhý nerezový suchý tobogán, obdobně jako u stezky v Lipně. Jsou v plánu i další atrakce jako je rukáv, umožňující výstup po husté síti z jednoho patra do druhého, hnízda, tunel na lávce či odpočinková síť.

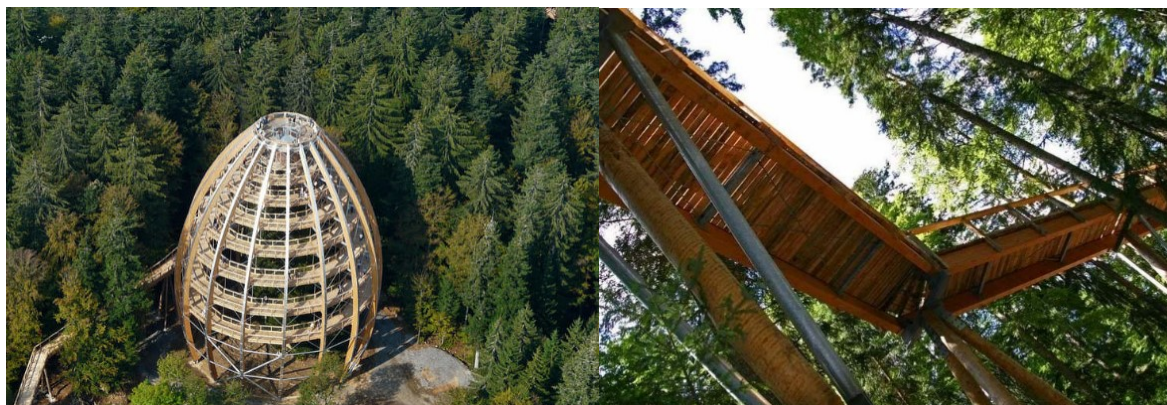
Informaci o konstrukci lávek, pomocí kterých se lze dostat k samotné vyhlídce se nepodařilo získat, je však pravděpodobné, že bude stejná jako konstrukce lávek vyhlídky. Ty jsou z ocelového prostorového příhradového nosníku (obr. č. 38). [66]



*Obr. č. 38: Stezka v oblacích Dolní Morava [65]*

### 5.1.3 Stezka korunami stromů v Německu

V německém národním parku Bavorský les se nachází další stezka korunami stromů zvaná „Baumwipfelpfad“, která byla na světě tou první a je také i nejdelší na světě. Byla postavena a otevřena v roce 2009. Její délka je 1320 metrů, výška pak 44 m. Statický výpočet prováděla společnost WIEHAG. Tato společnost navrhovala i konstrukci stezky v Lipně a proto je konstrukční systém lávek v Lipně obdobný. Podoba věže a konstrukční systém lávek je patrný z obrázku č. 39. [67]



*Obr. č. 39: Stezka korunami stromů v Bavorském lese [67]*

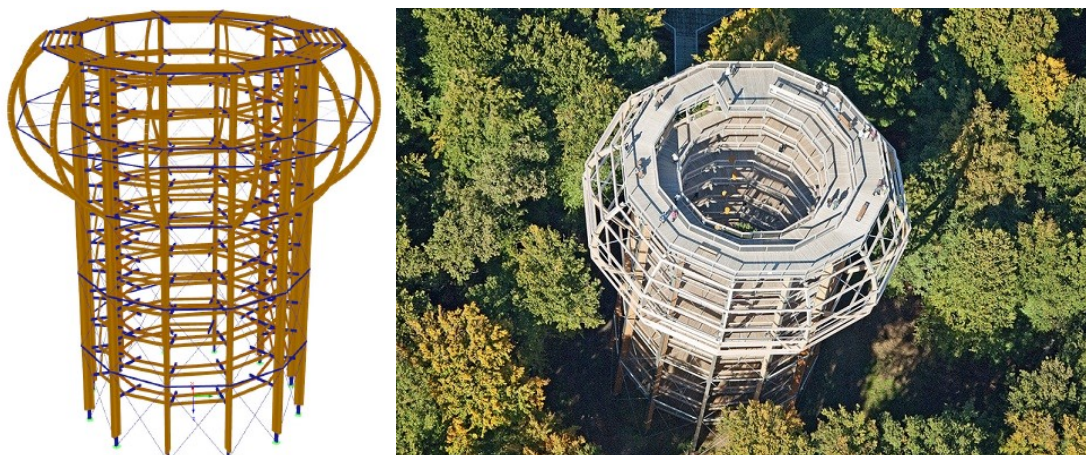
### 5.1.4 Stezka korunami stromů na ostrově Rujána na Baltském moři

Zážitkové centrum na ostrově Rujána je pro návštěvníky otevřeno od června 2013 a je to tak třetí realizovaná stezka společnosti WIEHAG. Vrcholem centra o rozloze 1900 hektarů je 40 m vysoká „věž s hnízdem“.

Konstrukce věže se skládá ze 12 svislých lepených lamelových nosníků umístěných po obvodu. Sloupy jsou podepřeny ocelovými nosníky na základových patkách. Věž je stabilizovaná hustou sítí diagonálních ocelových prutů a také vodorovnými kruhovými prvky.



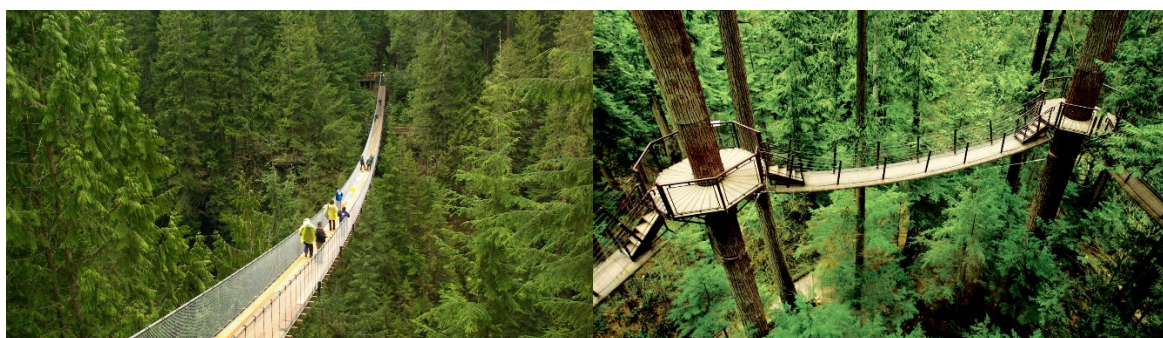
Podobu ptačího hnízda určují 12 oblouků z LLD, jejichž horní konce jsou připevněné k vykonzolované ocelové plošině a spodní konce k sloupům. Vnější průměr věže je přibližně 24 m a v úrovni „hnízda“ 36 metrů. K rozhledně je připojená 1250 metrů dlouhá stezka ve výšce 4 metry. Podoba věže a numerický model v programu Dlubal je vyobrazen na obr. č. 40. [69]



Obr. č. 40: Stezka korunami stromů na ostrově Rujána na Baltském moři [69], [68]

### 5.1.5 Capilano Suspension Bridge Park v Kanadě

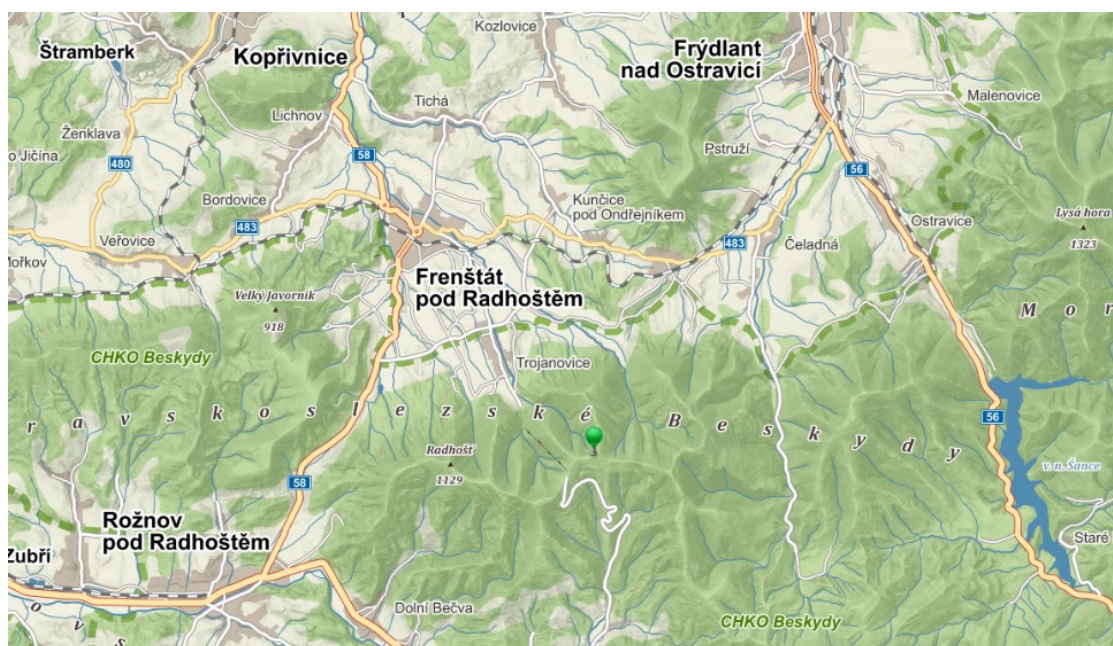
Další zajímavou ukázkou lávek v korunách stromů představuje Capilano Suspension Bridge park ve Vancouveru v Kanadě. Nosnými podporami lávek jsou přímo rostlé stromy (obr. č. 41). Exkluzivní je především visutá lanová lávka ve výšce 70 m nad řekou Capilano a dlouhá 137 m. Povídá se, že lávka má tak nepříznivou dynamickou odezvu na pohyb chodců, že je problematické pořídit ostrou fotografii. Visutá konstrukce lávky však příjemně doplňuje krajinný ráz okolní přírody a je nepochybně velkým adrenalinovým zážitkem. [70]



Obr. č. 41: Capilano Suspension Bridge Park ve Vancouveru v Kanadě [71]

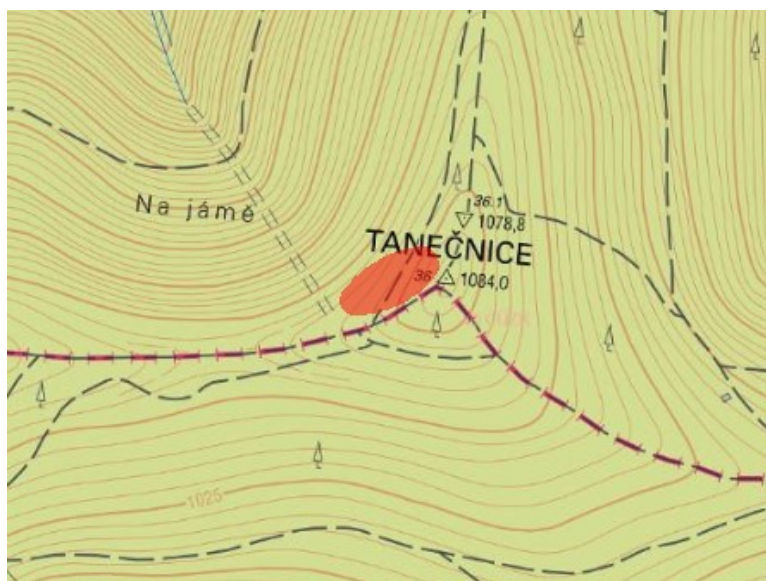
## 5.2 Seznámení se vstupy pro vypracování diplomové práce

Pro vypracování diplomové práce nejsou k dispozici podklady základající se na skutečnosti. Je však známo, že výstavba další stezky ve stromech s vyhlídkovou věží se v ČR plánuje. V současné době však ještě není známý tvar vyhlídkové věže, ani přesné polohové a výškové trasování lávek či počet a druh atrakcí. Pro vypracování diplomové práce však jakékoliv podklady nebyly nutností. Cílem bylo navrhnout lávku pro předpokládané rozpětí 27,9 m stoupající v mírném sklonu (vhodného i pro vozičkáře) do výšky až 19 m nad zemí a s volnou šířkou 2300 mm. V nejvyšším bodě by pak konstrukce lávek navazovala na vyhlídkovou věž. Místem budoucí stezky by měly být Beskydy poblíž areálu Pustevny. Přesněji se umístění stavby se plánuje na hranicích k.ú. Trojanovice a Prostřední Bečvy u vrchu Tanečnice, který je 1084 m.n.m. Lokalizace stezky je patrná ze snímku na obr. č. 42 a z katastrální mapy na obr. č. 43.



Obr. č. 42: Lokalizace stezky v korunách stromů [72]





Obr. č. 43: Lokalizace stezky v korunách stromů [73]

## 5.3 Přehled požadavků na konstrukci

### 5.3.1 Požadavky mezních stavů

Nejdůležitějším faktorem pro návrh konstrukce je její spolehlivost a požadovaná funkce po celou dobu její návrhové životnosti. To zajišťuje splnění dvou mezních stavů, mezního stavu únosnosti a mezního stavu použitelnosti, přičemž oba dva tyto mezní stavy mají stejnou váhu. Mezní stav použitelnosti nelze podceňovat. Dosažením mezních stavů přestává konstrukce plnit svou požadovanou funkci a není tedy použitelná a provozu schopná. Metoda mezních stavů se používá v Eurokódech, dle kterých je navrhována a posouzena tato konstrukce.

Mezní stav únosnosti souvisí se zřícením části nebo celé konstrukce, s porušením celistvosti prvků (zlomení, přetržení) a se ztrátou stability. Tyto jevy ohrožují všeobecnou bezpečnost. Většinou vyvolají potřebu oprav nebo odstranění konstrukce. Návrh dle Eurokódů zajistí, aby tento stav nebyl překročen.

Mezní stavy použitelnosti se týkají funkce konstrukce během běžného užívání, vzhledu konstrukce a pohody uživatelů. Konkrétně vyšetřujeme např. svislý a vodorovný průhyb, kmitání a vibrace vyvolávající nepohodu uživatele nebo funkční způsobilost konstrukce, šířku trhlin, napětí ve výztuži apod. Rozlišují se mezní stavy vratné a nevratné.

Způsob zatížení, který se vyskytuje na řešené konstrukci, může vyvolat nepříznivé kmitání konstrukce. Konstrukce je vystavena dynamickými účinky zapříčiněné chůzí osob. Je

nutné tedy vyšetřit, zda hodnota první vlastní frekvence konstrukce je dostatečně odlišná od budícího zdroje.

### **5.3.2 Technologické požadavky**

Konstrukce musí respektovat zásady technologičnosti a to jak výroby, tak montáže. Návrh konstrukce musí zajistit snadnou proveditelnost spojů. Během provozu pak umožnit snadný přístup pro kontroly, údržbu a případné opravy.

### **5.3.3 Provozní požadavky**

Konstrukce musí být navržena tak, aby respektovala všechny typologické a rozměrové požadavky. Důležité je dbát na požadavky bezbariérového přístupu.

### **5.3.4 Hospodárnost**

V dnešní době je jednou z nejdůležitějších požadavků na konstrukci kladena právě na hospodárnost. Ekonomickou stránku nelze opomenout jak z pohledu doby výstavby, způsobu přepravy dílců, montáže dílců, použité technologie, údržba konstrukce, tak z pohledu celkové hmotnosti a z něj vyplývající cena za nosné dílce. Diplomová práce zohlední několik možných variant a důležitým kritériem pro výběr nejvhodnější je právě celková hospodárnost díla.

### **5.3.5 Požární odolnost**

V případě požáru musí mít konstrukce po požadovanou dobu dostatečnou odolnost. Navrhují se různé protipožární povrchové úpravy konstrukčních dílců. Posouzení požární odolnosti není předmětem diplomové práce.

## **5.4 Aplikované vzorce**

V této podkapitole je uvedeno shrnutí nejpoužívanějších vzorců ve statickém výpočtu dřevěné lávky v korunách stromů.

### 5.4.1 Mezní stav použitelnosti

Mezní stavy použitelnosti se týkají funkce konstrukce během běžného užívání, vzhledu konstrukce a pohody uživatelů. Konkrétně byl vyšetřován svislý a vodorovný průhyb a kmitání a vibrace vyvolávající nepohodu uživatele.

#### 5.4.1.1 Průhyb

Pro získání hodnot okamžitých průhybů ze softwaru Scia Engineer byly aplikovány charakteristické kombinace zatížení. Pro výpočet konečné deformace bylo užito vzorců dle [5] odst. 2.2.3(5) a 7.2. Konstrukci je nutno zařadit do třídy provozu 3. Pro potřeby výpočtu byl určen deformační součinitel dle [7] tab. 3.2.

**Charakteristická kombinace zatížení:**

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} " + " P " + " Q_{k,1} " + " \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.4.1)$$

**Konečný průhyb:**

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} \quad (5.4.2)$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c \quad (5.4.3)$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) \quad (5.4.4)$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) \quad (5.4.5)$$

Kde:	$G_{k,j}$	je charakteristická hodnota j-tého stálého zatížení
	$Q_{k,1}$	je charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení
	$Q_{k,i}$	je charakteristická hodnota vedlejšího i-tého proměnného zatížení
	P	zatížení od předpětí
	$\psi_{0,i}$	je součinitel pro kombinační hodnotu proměnného zatížení
	$\psi_0 = 0,4$	pro zatížení dopravou (gr1)
	$\psi_0 = 0,3$	pro zatížení větrem
	$\psi_0 = 0,7$	pro zatížení sněhem (pro stavby umístěné ve výšce $H > 1000$ m.n.m.)
	$\psi_2 = 0$	je kombinační součinitel pro proměnné krátkodobé zatížení



$\psi_2 = 0,2$	je kombinační součinitel pro zatížením sněhem (pro stavby umístěné ve výšce $H > 1000$ m.n.m.)
$k_{def} = 2$	deformační součinitel pro lepené lamelové dřevo a třídu provozu 3
$w_c$	je hodnota předepsaného nadvýšení
$w_{fin}$	finální průhyb
$w_{net,fin}$	čistý finální průhyb
$w_{inst}$	okamžitý průhyb

### Limitní hodnoty průhybu:

Limitní hodnoty průhybů jsou převzaty z [6] tab. 7.1 a v [5] tab. 7.2.

Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} \leq w_{inst,lim} = \frac{L}{300} \quad (5.4.6)$$

Čistý konečný průhyb:

$$w_{net,fin} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} \quad (5.4.7)$$

Konečný průhyb:

$$w_{fin} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} \quad (5.4.8)$$

Konečný průhyb:

$$w_{fin} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} \quad (5.4.9)$$

Okamžitý průhyb způsobený chodci:

$$w_{inst,Q} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} \quad (5.4.10)$$

### 5.4.2 Mezní stav únosnosti

Kombinace zatížení pro mezní stav únosnosti byly vytvořeny na základě vztahu uvedený v ČSN EN 1990 1 odst. 6.4.3.2 a který je určen pro trvalou a dočasnou návrhovou situaci.

Kombinace zatížení pro trvalou a dočasnou návrhovou situaci:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.4.11)$$

Kde: $G_{k,j}$	je charakteristická hodnota j-tého stálého zatížení
$Q_{k,1}$	je charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení
$Q_{k,i}$	je charakteristická hodnota vedlejšího i-tého proměnného zatížení
P	je zatížení od předpětí
$\gamma_P$	je dílčí součinitel pro zatížení od předpětí
$\gamma_{G,j} = 1,35$	je dílčí součinitel j-tého stálého zatížení
$\gamma_{Q,1}/\gamma_{Q,i} = 1,5$	je dílčí součinitel hlavního/vedlejších proměnných zatížení (pro variantní řešení)
$\gamma_Q = 1,35$	pokud Q reprezentuje nepříznivě působící zatížení od silniční dopravy nebo od chodců
$\psi_{0,i}$	kombinační součinitel pro vedlejší proměnná zatížení

#### 5.4.2.1 Vlastnosti materiálů

Třídy průřezu a jejich charakteristické hodnoty pevnostních vlastností jsou obsaženy v normě ČSN EN 338 (731711): Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti.

Návrhové hodnoty pevností materiálu se určí dle vztahu:

$$f_d = k_{mod} \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (5.4.12)$$

#### 5.4.2.2 Tah rovnoběžně s vlákny

Návrhové napětí v tahu rovnoběžně s vlákny:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A \cdot 10^{-3}} \quad (5.4.13)$$

Posouzení v tahu rovnoběžně s vlákny:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (5.4.14)$$

Kde:  $f_{t,0,d}$  je návrhová pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny

### 5.4.2.3 Tlak rovnoběžně s vlákny

Návrhové napětí v tlaku rovnoběžně s vlákny:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A \cdot 10^{-3}} \quad (5.4.15)$$

Posouzení v tahu rovnoběžně s vlákny:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (5.4.16)$$

Kde:  $f_{c,0,d}$  je návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny

### 5.4.2.4 Smyk

Návrhové napětí ve smyku:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} \quad (5.4.17)$$

Kde:  $A_{ef} = b_{eff} \cdot h$  je efektivní plocha

$b_{eff} = b \cdot k_{cr}$  je efektivní šířka zohledňující vliv trhlin

$k_{cr} = 0,67$  pro rostlé dřevo i LLD

Posouzení ve smyku:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (5.4.18)$$

Kde:  $f_{v,d}$  je návrhová pevnost ve smyku

- Posouzení pro dvojosý smyk

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (5.4.19)$$

### 5.4.2.5 Ohyb

Návrhové napětí v ohybu k hlavním osám:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y \cdot 10^{-6}} \quad (5.4.20)$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{Ed,z}}{W_z \cdot 10^{-6}} \quad (5.4.21)$$

Posouzení v tahu rovnoběžně s vlákny:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.4.22)$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.4.23)$$

Kde:  $f_{m,y,d}, f_{m,z,d}$  je návrhová pevnost v ohybu k hlavním osám  
 $k_m$  je součinitel zohledňující vliv redistribuce ohybových napětí v průřezu a vliv nehomogenit materiálu v průřezu  
 $k_m = 0,7$  pro obdélníkové průřezy  
 $k_m = 1$  pro ostatní průřezy

#### 5.4.2.6 Kombinace ohybu a osového tahu

Návrhová napětí v ohybu k hlavním osám a v tahu rovnoběžně s vlákny dle ( 5.4.13), ( 5.4.20), ( 5.4.21).

Posouzení v ohybu v kombinaci s tahem:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.4.24)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.4.25)$$

Kde:  $k_m, f_{m,y,d}, f_{m,z,d}, f_{t,0,d}$  viz. odst. 5.4.2.5 a 5.4.2.1

#### 5.4.2.7 Kombinace ohybu a osového tlaku

Návrhová napětí v ohybu k hlavním osám a v tlaku rovnoběžně s vlákny dle ( 5.4.15), ( 5.4.20), ( 5.4.21).

Posouzení v ohybu v kombinaci s tahem:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.4.26)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.4.27)$$

Kde:  $k_m, f_{m,y,d}, f_{m,z,d}, f_{c,0,d}$  viz. odst. 5.4.2.5 a 5.4.2.3

#### 5.4.2.8 Kombinace ohybu a vzpěrného tlaku

Pro prvky, které jsou vystavené buď tlaku nebo kombinaci ohybu a tlaku.

Návrhová napětí v ohybu k hlavním osám a v tlaku rovnoběžně s vlákny dle ( 5.4.15),

( 5.4.20), ( 5.4.21).

Štíhlostní poměry:

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \quad ( 5.4.28)$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \quad ( 5.4.29)$$

Kde:  $L_{cr,y}, L_{cr,z}$  jsou vzpěrné délky pro vybočení v rovině nebo z roviny prvku  
 $i_y, i_z$  jsou poloměry setrvačnosti k hlavním osám

Poměrné štíhlostní poměry:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad ( 5.4.30)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad ( 5.4.31)$$

Kde:  $f_{c,0,k}$  je charakteristická hodnota pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny  
 $E_{0,05}$  je hodnota 5 % kvantilu modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny

Součinitelé  $k_y, k_z$ :

$$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad ( 5.4.32)$$

$$k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad ( 5.4.33)$$

Kde:  $\beta_c = 0,2$  součinitel křivosti pro rostlé dřevo  
 $\beta_c = 0,1$  součinitel křivosti pro LLD

Součinitelé vzpěrnosti  $k_{c,y}, k_{c,z}$ :

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad ( 5.4.34)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad ( 5.4.35)$$

Posouzení v ohybu v kombinaci se vzpěrným tlakem:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.4.36)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.4.37)$$

Kde:  $k_m, f_{m,y,d}, f_{m,z,d}, f_{c,0,d}$  viz. odst. 5.4.2.3 a 5.4.2.5

#### 5.4.2.9 Příčná a torzní stabilita

Pro prvky, které jsou vystavené buď ohybu nebo kombinaci ohybu a tlaku.

Návrhová napětí v ohybu k hlavním osám a v tlaku rovnoběžně s vlákny dle (5.4.15), (5.4.20), (5.4.21).

Kritické napětí v ohybu pro celistvý obdélníkový průřez:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78b^2}{hl_{ef}} E_{0,05} \quad (5.4.38)$$

Kritické napětí v ohybu pro ostatní průřezy:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{l_{ef} W_y} \quad (5.4.39)$$

Kde:  $E_{0,05}$  je hodnota 5 % kvantilu modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny  
 $G_{0,05}$  je hodnota 5 % kvantilu modulu pružnosti ve smyku rovnoběžně s vlákny  
 $I_z$  je moment setrvačnosti k ose menší tuhosti z  
 $I_{tor}$  je moment setrvačnosti v kroucení  
 $l_{ef}$  je účinná délka nosníku závislá na podmínkách uložení a uspořádání zatížení dle tab. 6.1 v [5]; působí-li zatížení na tlačném okraji nosník má se  $l_{ef}$  zvýšit o  $2h$ , působí-li na okraji taženém může se snížit o  $0,5h$   
 $l_{ef}/l = 0,9$  pro prostě podepřeny nosník a spojitě zatížení dle tab. 6.1 v [5]

Poměrné štíhlosti v ohybu:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (5.4.40)$$

Kde:  $f_{m,k}$  je charakteristická hodnota pevnosti v ohybu

Součinitel  $k_{crit}$ :

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{pro } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{pro } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{pro } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (5.4.41)$$

Posouzení v případě existence pouze momentu k ose větší tuhosti y:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d} \quad (5.4.42)$$

Kde:  $f_{m,d}$  je návrhová hodnota pevnosti v ohybu

Posouzení v případě kombinace momentu  $M_y$  k ose větší tuhosti y a tlakové síly  $N$ :

$$\left( \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (5.4.43)$$

Kde:  $\sigma_{c,d}, f_{c,0,d}$  viz. odst. 5.4.2.3

### 5.4.3 Modální analýza

Modální analýza (úloha o vlastních hodnotách, zobecněný problém vlastních hodnot) je základní úlohou dynamiky. Výpočet frekvencí a vlastních tvarů kmitání je nedílnou součástí dynamického posouzení všech konstrukcí (strojů, lávek, mostů, stožárů, komínů, apod.) V rámci posouzení variant byly proto zjištěny základní dynamické vlastnosti nosné konstrukce a to vlastní frekvence a odpovídající tvary vlastního kmitání ve směru svislém, vodorovném a torzním. Analýza byla provedena pomocí programu Scia Engineer. Bylo možné výpočet provést metodou iterace podprostoru, Lanczos nebo metodou iterační (ICG). Volba řešiče vlastních čísel závisí především na velikosti modelu a má rozhodující vliv na dobu trvání výpočtu při dynamické analýze.

Metoda iterace podprostoru je vhodná pro malé a středně velké úlohy z dobře tvarovaných objemových a skořepinových prvků a v případě omezené kapacity paměti počítače. Metodou lze získat velké množství vlastních hodnot a všechna vlastní čísla jsou stanovena v jednom kroku. Vzhledem k tomu, že je matice tuhosti uložena v operační paměti, není tato metoda vhodná pro komplexní systémy.

Přednost Lanczosovy metody se projevuje zejména u úloh s velkým počtem stupňů volnosti. Je vhodná pro velké modely, které se skládají z objemových prvků a nevhodně tvarovaných skořepinových prvků. Pracuje rychleji, ale je potřeba o 50% více paměti než u metody iterace podprostoru. Vlastní čísla jsou stanovena přímo.

Metoda sdružených gradientů ICG (Incomplete Conjugate Gradient) byla vyvinuta pro rozsáhlé úlohy, při nichž již operační paměť počítače nestačí. Vzhledem k tomu, že jsou vlastní čísla stanovena jedno po druhém, vyžaduje tato metoda málo operační paměti, vyžaduje však více času ve srovnání s přímými metodami. Metoda je vhodná pro výpočet velmi velkých systémů s nižším počtem vlastních čísel. [32]

Pro potřeby porovnání variant byla aplikována metoda iterace podprostoru a ověřena ručním výpočtem pomocí přibližné Rayleighovy energetické metody.

#### 5.4.3.1 Vlastní kmitání

Z hlediska mechaniky konstrukce lze úlohu o nalezení vlastních frekvencí a vlastních tvarů netlumených kmitání charakterizovat jako obecný problém vlastních čísel popsanych rovnicí:

$$(K - \omega^2 M)r = 0$$

Kde:  $K$  je matice tuhosti

$M$  je matice hmotnosti uvažované konstrukce

$r$  je vlastní tvar kmitání příslušný k vlastní frekvenci

Výše uvedená rovnice umožňuje vypočítat  $n$  vlastních frekvencí  $\omega_i$  a  $n$  vlastních tvarů  $r_i$ . Při výpočtu prvků matice hmotnosti se vychází z objemové hmotnosti materiálu jednotlivých prutů. Hmotnost, která přímo nesouvisí se zadanou konstrukcí, má však vliv na dynamické chování konstrukce, lze do programu Scia Engineer zavést pomocí soustředěných hmot. [31]

#### 5.4.3.2 Princip Rayleighovy energetické metody

Řešení rovnic pro zjištění vlastních čísel metodou pružnostních konstant či příčinků bývá tím pracnější, čím více stupňů volnosti soustava má. Proto jsou užívány metody přibližné. Nejznámější takovou metodou je Rayleighova energetická metoda pomocí níž lze získat přibližnou hodnotu základního, tj. nejnižšího nebo prvního vlastního kmitočtu



soustavy. Metoda je založena na principu zákona zachování mechanické energie, který říká,

že potenciální energie krajní polohy se rovná kinetické energie v poloze nulové (5.4.45).

Nebo-li součet kinetické a potenciální energie se rovná konstantě, což vyjadřuje následující vztah (5.4.44) [33], [23]:

$$E_k + E_p = \frac{1}{2} \dot{u}^T(t) M \dot{u}(t) + \frac{1}{2} u^T(t) K u(t) = konst. \quad (5.4.44)$$

$$\max E_k = \max E_p \quad (5.4.45)$$

Pro vlastní kmitání platí:

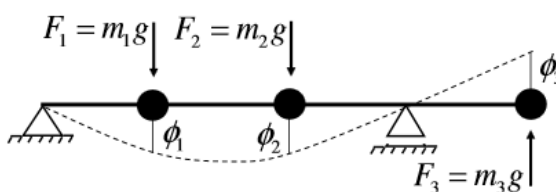
$$u(t) = \phi C \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\dot{u}(t) = \omega \phi C \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\max u(t) \cong \phi$$

$$\max \dot{u}(t) \cong \omega \phi$$

Tvar kmitání  $\theta$  se volí tak, aby odpovídal prvnímu tvaru nejlépe od zatížení vlastní tíhou  $F_i$  působící ve směru kmitání (obr. č. 44).



Obr. č. 44: Princip Rayleighovy energetické metody [33]

$$K u = K \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} \max E_k &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i \dot{u}_i^2 \\ &= \frac{1}{2} \omega^2 \sum_{i=1}^N m_i \phi_i^2 \\ \max E_p &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N F_i \phi_i \end{aligned} \right\} \quad \omega = \omega_i = \left( \frac{\sum_{i=1}^N F_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.4.46)$$

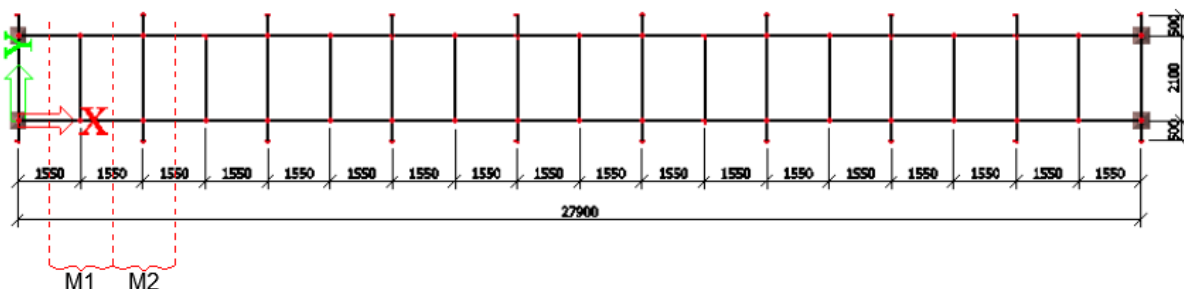
### 5.4.3.3 Výpočet vlastních frekvencí pro ověření hodnot vypočtených programem Scia Engineer

Na ukázkou je zde uveden výpočet ručního ověření vlastních frekvencí. Jedná se o ověření jedné z variant (viz. odst. 5.5.1.3). Způsobem uvedeným níže byly ověřeny hodnoty vlastních frekvencí všech variant včetně lanové.

**Krok 1.** - Výpočet hmotnosti prvků pro uvažovanou část konstrukce:

Vzpěra:	$0,080.0,080.350.1,581 = 3,54144 \text{ kg}$
Příčník (prodloužený):	$0,100.0,250.350.3,1 = 27,125 \text{ kg}$
Diagonála:	$0,070.0,070.350.2,157 = 3,699255 \text{ kg}$
Horní pás:	$0,110.0,250.350.1,55 = 14,91875 \text{ kg}$
Dolní pás:	$0,100.0,250.350.1,55 = 13,5625 \text{ kg}$
Příčník:	$0,100.0,250.350.2,1 = 18,375 \text{ kg}$
Sloupek:	$0,080.0,080.350.1,5 = 3,36 \text{ kg}$

**Krok 2.** - Výpočet celkové hmotnosti uvažovaných částí konstrukce:

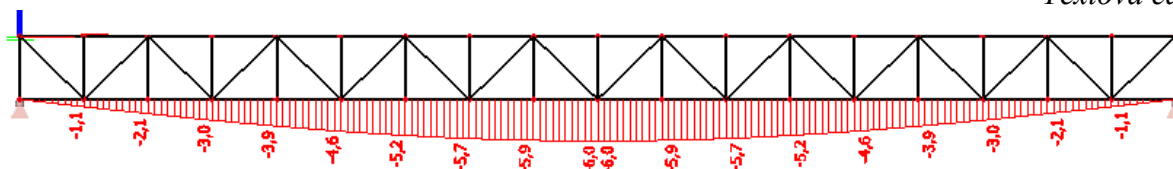


Obr. č. 45: Označení hmotností  $M_1$  a  $M_2$

$$M_1 = 3,36.2 + 18,375 + 13,5625.2 + 14,91875.2 + 3,699255.2 = 89,456 \text{ kg}$$

$$M_2 = 3,36.2 + 3,699255.2 + 27,12 + 3,54144.2 + 13,5625.2 + 14,91875.2 = 105,28889 \text{ kg}$$

**Krok 3.** – Hodnoty průhybů ve styčnicích od vlastní tíhy konstrukce



Obr. č. 46: Průhyb konstrukce od vlastní tíhy

$w_1 = 0,0011 \text{ m}$	$F_1 = 877,563 \text{ N}$	$w_6 = 0,0052 \text{ m}$	$F_6 = 1032,884 \text{ N}$
$w_2 = 0,0021 \text{ m}$	$F_2 = 1032,884 \text{ N}$	$w_7 = 0,0057 \text{ m}$	$F_7 = 877,563 \text{ N}$
$w_3 = 0,0030 \text{ m}$	$F_3 = 877,563 \text{ N}$	$w_8 = 0,0059 \text{ m}$	$F_8 = 1032,884 \text{ N}$
$w_4 = 0,0039 \text{ m}$	$F_4 = 1032,884 \text{ N}$	$w_9 = 0,006 \text{ m}$	$F_9 = 877,563 \text{ N}$
$w_5 = 0,0046 \text{ m}$	$F_5 = 877,563 \text{ N}$		

(Pozn.: Bylo uvažováno s tíhovým zrychlením  $9,81 \text{ m/s}^2$ )

**Krok 4.** – Dosazení do vzorce ( 5.4.46) uvedeného v předešlém odstavci. 5.4.3.2.

Výsledkem pro první svislou vlastní frekvenci je hodnota  $7,17 \text{ Hz}$ . Program Scia Engineer vypočítal vlastní frekvenci ve svislém směru o hodnotě  $7,20 \text{ Hz}$ , viz. obrázek níže.

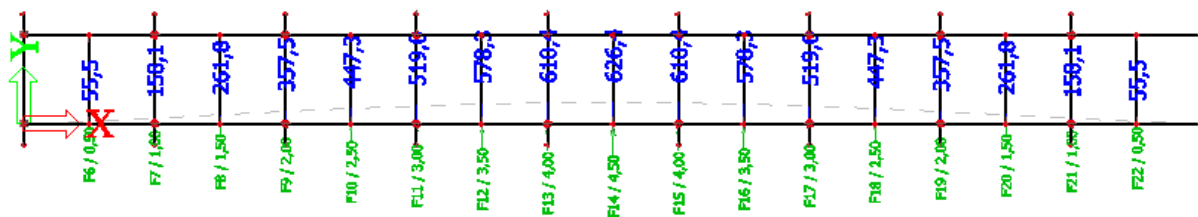
#### Souč. participace tvaru

Režim	Omega [rad/s]	Perioda [s]	Frekv. [Hz]	Wxi / Wxtot	Wyi / Wytot	Wzi / Wztot	Wxi_R / Wxtot_R	Wyi_R / Wytot_R	Wzi_R / Wztot_R
1	7.9107	0.7943	1.2590	0.0000	0.7501	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000
2	16.9137	0.3715	2.6919	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4923
3	27.8736	0.2254	4.4362	0.0000	0.1002	0.0000	0.0015	0.0000	0.0000
4	39.4492	0.1593	6.2785	0.0000	0.0003	0.0000	2.2911	0.0000	0.0000
5	41.1741	0.1526	6.5531	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1500
6	45.2344	0.1389	7.1993	0.0000	0.0000	0.7820	0.0000	0.0000	0.0000
7	57.1080	0.1100	9.0890	0.0000	0.0406	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
8	75.6401	0.0831	12.0385	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0756
				0.0000	0.8911	0.7820	2.2943	0.0000	0.7179

Obr. č. 47: Součinitel participace tvaru pro variantu č. 3

Ručním výpočtem byla ověřena hodnota svislé frekvence vypočtená programem Scia Engineer. Hodnoty vzájemně s rozdílem třech setin korespondují.

Obdobným způsobem byla ověřena vodorovná vlastní frekvence, s tím rozdílem, že pro zjištění vodorovných průhybů bylo nutné konstrukci zatížit ve vodorovném směru.



Obr. č. 48: Hodnoty vodorovných průhybů od lineárně rostoucích sil

$w_1 = 0,0555 \text{ m}$	$F_1 = 500 \text{ N}$	$w_6 = 0,519 \text{ m}$	$F_6 = 3\,000 \text{ N}$
$w_2 = 0,1581 \text{ m}$	$F_2 = 1\,000 \text{ N}$	$w_7 = 0,5783 \text{ m}$	$F_7 = 3\,500 \text{ N}$
$w_3 = 0,2618 \text{ m}$	$F_3 = 1\,500 \text{ N}$	$w_8 = 0,6104 \text{ m}$	$F_8 = 4\,000 \text{ N}$
$w_4 = 0,3575 \text{ m}$	$F_4 = 2\,000 \text{ N}$	$w_9 = 0,6264 \text{ m}$	$F_9 = 4\,500 \text{ N}$
$w_5 = 0,4473 \text{ m}$	$F_5 = 2\,500 \text{ N}$		

Dosazením do vzorce ( 5.4.46) uvedeného v odstavci 5.4.3.2 byla vypočtena první vlastní frekvence 1,29 Hz odpovídající vodorovnému směru. Program Scia Engineer vypočítal první vlastní frekvenci o hodnotě 1,26 Hz, viz. obrázek č. 47. Hodnoty se liší pouze o 3 setiny a je to možné konstatovat, že modální analýza je vypočtena správně.

#### Souč. participace tvaru

Režim	Omega [rad/s]	Perioda [s]	Frekv. [Hz]	Wxi / Wxtot	Wyi / Wytot	Wzi / Wztot	Wxi_R / Wxtot_R	Wyi_R / Wytot_R	Wzi_R / Wztot_R
*Studentův verze* *Studentův verze* *Studentův verze* *Studentův verze* *Studentův verze* *Studentův verze* *Studentův verze* *Studentův verze* *Studentův verze* *Studentův verze*									
1	7.9107	0.7943	1.2590	0.0000	0.7501	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000
2	16.9137	0.3715	2.6919	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4923
3	27.8736	0.2254	4.4362	0.0000	0.1002	0.0000	0.0015	0.0000	0.0000
4	39.4492	0.1593	6.2785	0.0000	0.0003	0.0000	2.2911	0.0000	0.0000
5	41.1741	0.1526	6.5531	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1500
6	45.2344	0.1389	7.1993	0.0000	0.0000	0.7820	0.0000	0.0000	0.0000
7	57.1080	0.1100	9.0890	0.0000	0.0406	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
8	75.6401	0.0831	12.0385	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0756
				0.0000	0.8911	0.7820	2.2943	0.0000	0.7179

## 5.5 Variantní řešení

Úvod praktické části diplomové práce se zabývá hledáním nosného systému lávky, která bude tou neoptimálnější variantou. Účelem studie variant je jejich vzájemné porovnání z hlediska hmotnosti nosné konstrukce, její tuhosti a vlastností v oblasti dynamiky. Bylo zvoleno pole lávky s předem určeným rozpětím o velikost 27,9 m. Všechny numerické modely byly tedy navrženy pro identické rozpětí. Ve styčnicích uprostřed rozpětí na okrajích příčného řezu byly lávky zatíženy celkem dvěma bodovými silami o velikosti 10 kN. Jednotlivé varianty byly předběžně navrženy pro mezní stav použitelnosti a mezní stav

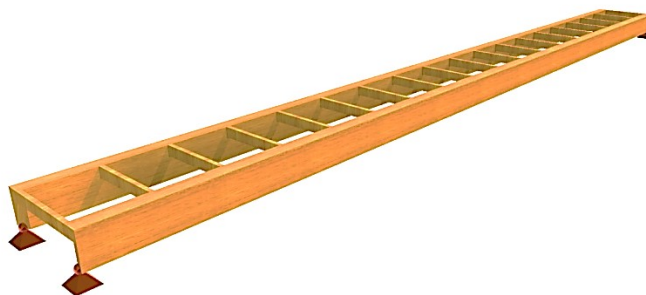
únosnosti, přičemž snahou bylo dosáhnout maximálního využití prvků. Průřezy byly redukovány, dokud nedošlo k porušení jednoho z mezních stavů. Pro potřeby výpočtu byly všechny konstrukce zařazeny do třídy provozu 3. Sledována byla celková hmotnost konstrukce, tuhost ve svislém a vodorovném směru. Součástí jsou i modální analýzy provedeny programem Scia Engineer metodou zpětné iterace podprostoru a získání prvních vlastních frekvencí a odpovídající svislý, vodorovný či torzní tvar kmitu. Hodnoty vlastních frekvencí byly ověřeny ručním výpočtem pomocí Rayleighovy energetické metody.

V závěru této podkapitoly se bude práce zabývat vzájemným porovnáním všech získaných hodnot, všech kladů a záporů jednotlivých variant a konečným vyhodnocením optimální varianty.

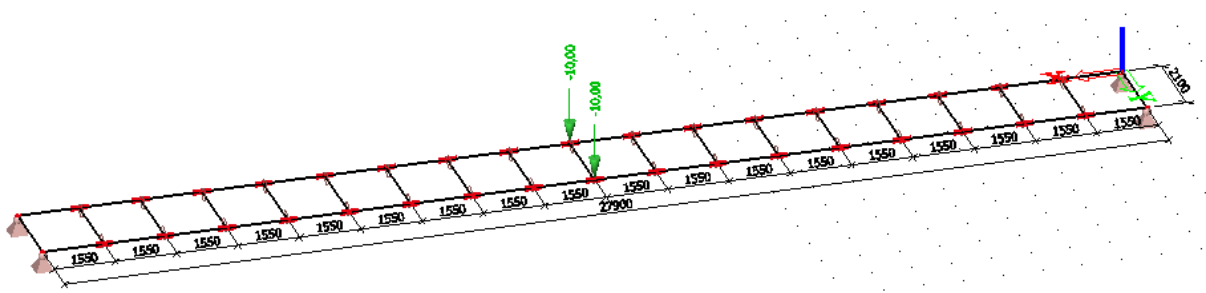
## 5.5.1 Seznámení s variantami

### 5.5.1.1 Varianta č.1

První varianta představuje typické řešení jednoduchých lávek. Nosný systém tvoří dva hlavní nosníky obdélníkového průřezu z lepeného lamelového dřeva třídy GL24h, které jsou vzájemně propojeny pomocí příčníků z rostlého dřeva třídy C24. Vzdálenost příčníků je 1,55 m. Všechny spoje jsou modelovány jako kloubové. Konstrukce a numerický model je znázorněn na obr. č. 49 a obr. č. 50.



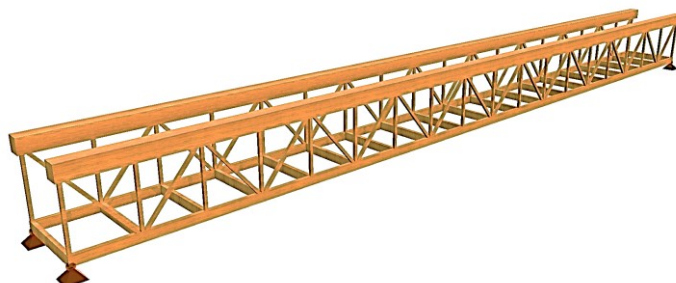
Obr. č. 49: Hlavní nosná konstrukce varianty č.1



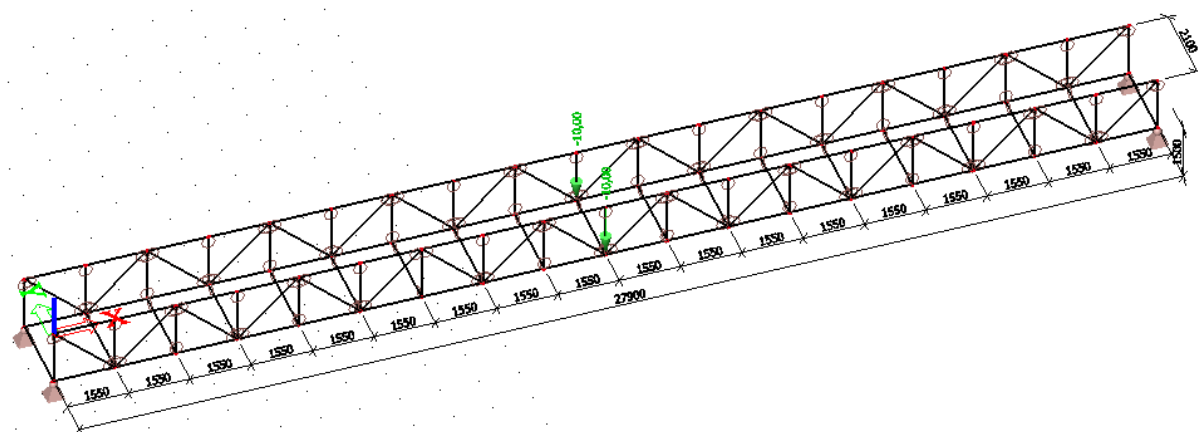
Obr. č. 50: Numerický model varianty č. 1

### 5.5.1.2 Varianta č.2

Ve variantě č. 2 je řešena nosná konstrukce lávky ze dvou hlavních příhradových nosníků, tvořící zároveň zábradlí lávky. Horní pásy příhradových nosníků jsou z lepeného lamelového dřeva třídy GL24h., dolní pás, svislice a diagonály pak z rostlého dřeva třídy C24. Hlavní nosníky jsou vzájemně spojeny příčníky, opět ze dřeva třídy C24 a ve vzdálenostech 1,55 m. Všechny spoje jsou řešeny jako kloubové. Konstrukce a numerický model je znázorněn na obr. č. 51 a obr. č. 52.



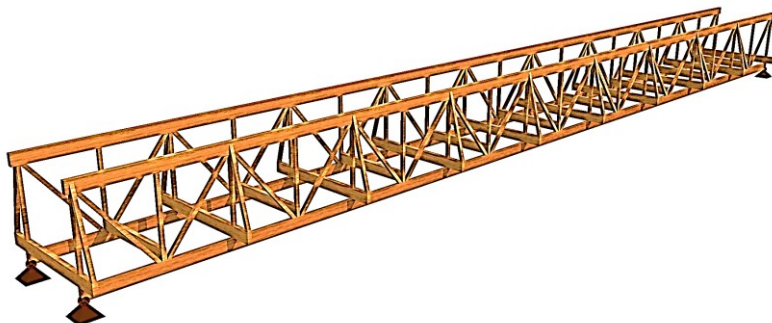
Obr. č. 51: Hlavní nosná konstrukce varianty č.2



Obr. č. 52: Numerický model varianty č. 3

### 5.5.1.3 Varianta č.3

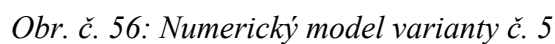
Konstrukce varianty třetí je opět ze dvou příhradových hlavních nosníků, přičemž konce každého druhého příčníku přesahují o 0,5 m. Volné konce příčníků jsou pak uchyceny pomocí vzpěr kotvených v místě styčnicku svislice, diagonál a horního pásu. Nosné prvky jsou z rostlého dřeva třídy C24. Všechny spoje jsou opět modelovány jako kloubové. Konstrukce je znázorněna na obr. č. 53 a obr. č. 54.



Obr. č. 53: Nosná konstrukce varianty č.3



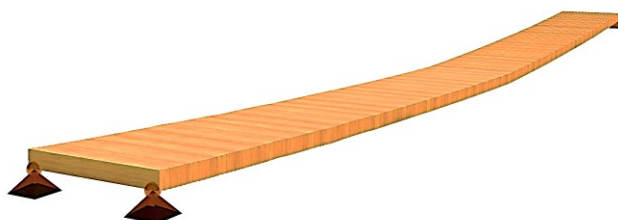
Čtvrtá varianta představuje konstrukci tvořenou prostorovým příhradovým nosníkem. Nosné prvky jsou ze dřeva rostlého třídy C24. Všechny spoje jsou řešeny jakou kloubové. Stavba konstrukce je patrná z obr. č. 55 a obr. č. 56.



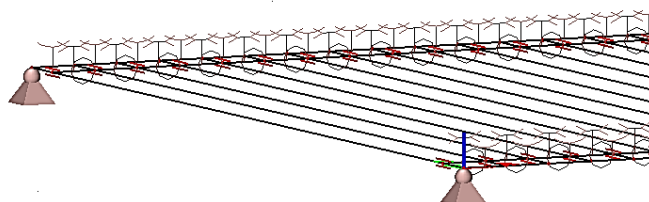


### 5.5.1.5 Varianta č.5

Varianta č. 5 představuje lanová konstrukce. Nosnou funkci lávky varianty č. 5 zajišťují ocelová lana s pevností v tahu 1770 MPa a modulem pružnosti 200 GPa. Tuhost v příčném směru zajišťuje tuhá mostovka z prvků z rostlého dřeva třídy C24. Prvky mostovky jsou kloubově spojeny ocelovou pásovinou o jednotkové hmotnosti, na nichž byl vyloučen tah. V programu Scia Engineer byly pro lana zadány nelinearity pomocí funkcionality „lano“ a předpětí. Zda – li bylo správně zadáno předpětí a nelinearity typu „lano“ bylo ověřeno ručním výpočtem na jednoduchém příkladu, jež je uveden v odst. 5.5.2.6. Konstrukce a detail zadaných entit na numerickém modelu je vyobrazen na obr. č. 57 a obr. č. 58.



Obr. č. 57: Konstrukce varianty č.5



Obr. č. 58: Detail numerického modelu varianty č.5

## 5.5.2 Výsledky variantního řešení

Následující podkapitola obsahuje výsledné hodnoty variantních řešení, včetně kritických posudků, výsledné hmotnosti a tuhosti konstrukce a dynamických vlastností konstrukce.

### 5.5.2.1 Vlastnosti materiálů

Charakteristické hodnoty:

	GL24h	C24
<i>Pevnost v ohybu:</i>	$f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$	$f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny:</i>	$f_{t,0,k} = 16,5 \text{ MPa}$	$f_{t,0,k} = 14 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:</i>	$f_{c,0,k} = 24 \text{ MPa}$	$f_{c,0,k} = 21 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tlaku kolmo na vlákna:</i>	$f_{c,90,k} = 2,7 \text{ MPa}$	$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ MPa}$
<i>Pevnost ve smyku:</i>	$f_{v,k} = 2,7 \text{ MPa}$	$f_{v,k} = 4 \text{ MPa}$
<i>5% kvantil modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny:</i>	$E_{0,05} = 9400 \text{ MPa}$	$E_{0,05} = 7400 \text{ MPa}$
<i>Hustota</i>	$\rho_k = 380 \text{ kg.m}^{-3}$	$\rho_k = 350 \text{ kg.m}^{-3}$
<i>Dílčí součinitel <math>\gamma_M</math></i>	$\gamma_M = 1,25$	$\gamma_M = 1,3$
<i>Modifikační součinitel (dle tab. 3.1 v [7])</i>	$k_{mod} = 0,9$	$k_{mod} = 0,9$

Návrhové hodnoty byly spočteny dle vzorce ( 5.4.12):

	GL24h	C24
<i>Pevnost v ohybu:</i>	$f_{m,d} = 17,28 \text{ MPa}$	$f_{m,k} = 16,62 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny:</i>	$f_{t,0,d} = 11,88 \text{ MPa}$	$f_{t,0,k} = 9,69 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:</i>	$f_{c,0,d} = 17,28 \text{ MPa}$	$f_{c,0,k} = 14,54 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tlaku kolmo na vlákna:</i>	$f_{c,90,d} = 1,94 \text{ MPa}$	$f_{c,90,k} = 1,73 \text{ MPa}$
<i>Pevnost ve smyku:</i>	$f_{v,d} = 1,94 \text{ MPa}$	$f_{v,k} = 2,77 \text{ MPa}$

### 5.5.2.2 Varianta č.1

U této varianty docházelo k porušení mezního stavu použitelnosti dříve než mezního stavu únosnosti. Byl tedy sledován průhyb. Cílem bylo vyhovět limitním hodnotám okamžitého, čistého konečného bez nadvýšení i finálního průhybu, jež jsou uvedené v odst. 5.4.1.1. Pro zjištění celkového okamžitého průhybu byla aplikována charakteristická kombinace zatížení dle vzorce (5.4.1). Pro výpočet konečné deformace bylo užito vzorců dle ( 5.4.2) až ( 5.4.5).

Na obr. č.59 a obr. č.60 je vykreslen okamžitý průhyb od jednotlivých zatěžovacích stavů. Následně je pak uveden výpočet všech potřebných průhybů, které jsou pro konstrukci

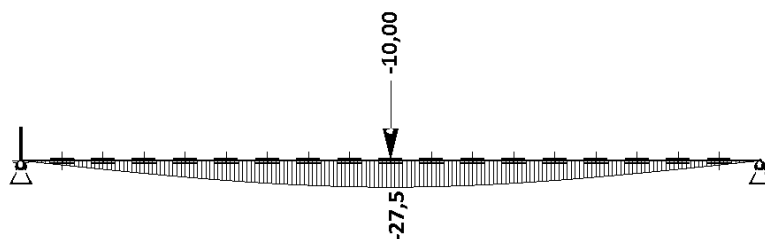
kritickým posudkem. Použité průřezy jsou sepsány v tabulce č. 1. Celková hmotnost konstrukce činí **6212 kg**. Výpočet celkové hmotnosti materiálu, jeho výpis a modální analýza byla provedena pomocí programu Scia Engineer 2014. Ruční ověření bylo provedeno v souladu se vztahem ( 5.4.46). V tabulce č. 2 jsou sepsány hodnoty tuhostí ve svislém a vodorovném směru. V tabulce č. 3 jsou sepsány výsledky modální analýzy.

- **1. ZS:** vlastní tíha



Obr. č. 59: Okamžitý průhyb  $w_{inst,1}$  vyvolaný vlastní tíhou

- **2. ZS:** dvojice sil o velikosti 10 kN



Obr. č. 60: Okamžitý průhyb  $w_{inst,2}$  vyvolaný dvojicí sil o velikosti 10 kN

#### Ověření průhybů dle (5.4.1) až ( 5.4.10):

##### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 52,2 + 27,5 = 79,7 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dvojicí sil:

$$w_{inst,Q_1} = 27,5 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{27900}{400} = 69,75 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 79,7 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{27900}{300} = 93 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 75 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 52,2(1 + 2) = 156,6 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 27,5(1 + 0,2) = 27,5 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} = 156,6 + 27,5 + 0 = 184,1 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 184,1 - 75 = 109,1 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 109,1 \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{27900}{250} = 93 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 184,1 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{27900}{150} = 186 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

OZNAČENÍ	POPIS	TŘÍDA	ROZMĚRY ŠÍŘKA/VÝŠKA [mm]	HMOTNOST [kg/m]	CELKOVÁ DÉLKA [m]	HMOTNOST [kg]
HN	hlavní nosník	GL24h	350/790	105,1	55,8	5862,9
P	příčník	C24	100/250	8,8	39,9	349,1
HMOTNOST CELKEM:						6212

Tab. č. 1: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.1

DVOJICE SVISLÝCH SÍL [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD SVISLÉ SÍLY [mm]	VODOROVNÁ SÍLA [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD VODOROVNÉ SÍLY [m]	KONEČNÝ CELKOVÝ PRŮHYB [mm]	TUHOST VE SVISLÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	TUHOST VE VODOROVNÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]
20	27,5	20	68,1	190,1	7,3E+05	2,9E+05

Tab. č. 2: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.1

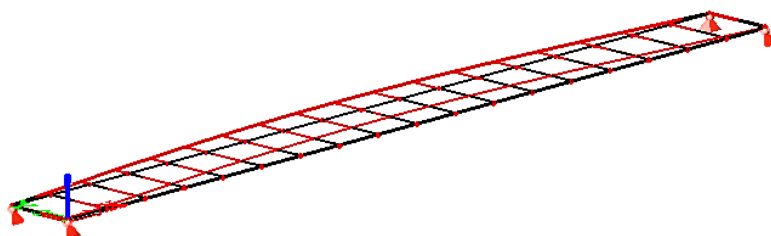
### Modální analýza dle odst. 5.4.3:

POPIS TVARU KMITÁNÍ	POŘADÍ VLASTNÍHO TVARU	FREKVENCE (RUČNÍ VÝPOČET) [Hz]	FREKVENCE (SCIA ENGINEER) [Hz]	MINIMÁLNÍ FREKVENCE [Hz]	OVĚŘENÍ POHODY CHODCŮ
Svislé	2.	2,43	2,46	< 5	Je nutné
Vodorovné	1.	1,59	1,58	< 2,5	Je nutné
Torzní	3.	-	2,52	> 2,5	Není nutné

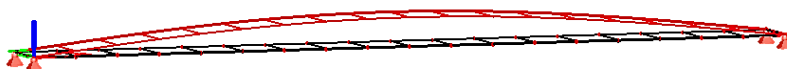
Tab. č. 3: Výsledky modální analýzy varianty č. 1

### Tvary vlastního kmitání:

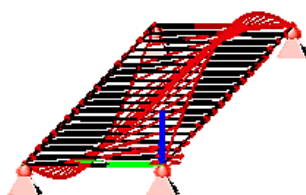
- vodorovné kmitání (1,58 Hz) – 1. vlastní tvar



- svislé kmitání (2,46 Hz) – 2. vlastní tvar



- kroutivé kmitání (2,52 Hz) – 3. vlastní tvar



### 5.5.2.3 Varianta č.2

U varianty druhé dochází k překročení prvního mezního stavu únosnosti dříve, než mezního stavu použitelnosti. Snahou bylo navrhnout průřezy na maximální možné využití. Problémem u tohoto typu lávky s dolní mostovkou je stabilita horních pásů, a proto je kritickým posudkem vzpěrný tlak v kombinaci s ohybem.

Použité průřezy jsou sepsány v tabulce č.4. Celková hmotnost konstrukce činí 4362 kg. Výpočet celkové hmotnosti materiálu, jeho výpis a modální analýza byla provedena

pomocí programu Scia Engineer 2014. V tabulce č.5 jsou sepsány hodnoty tuhostí ve svislém a vodorovném směru. V tabulce č.6 jsou sepsány výsledky modální analýzy.

## Posouzení prvků konstrukce varianty č.2

### Horní pás

Horní pásy byly vzhledem k velikosti průřezu navrhнуты z LLD GL24h. Rozměry prvku byly navrhнуты o velikosti 400/380 mm. Kritickým posudkem pro horní pás je únosnost ve vzpěrném tlaku v kombinaci s ohybem.

#### - Průřezové charakteristiky

Plocha:  $A = b \cdot h = 400 \cdot 380 = 152000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 9,63 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 1,01 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 1,83 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$

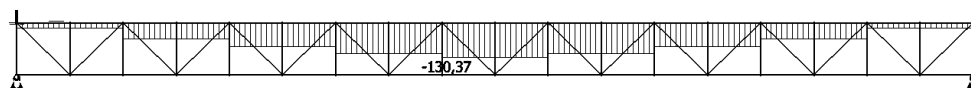
$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 2,03 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 109,7 \text{ mm}$

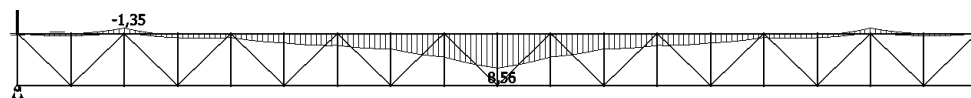
$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 115,47 \text{ mm}$$

#### Vnitřní síly:

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 130,37 \text{ kN}$



Ohybový moment:  $M_{Ed,max} = 8,56 \text{ kN}$



Návrhová napětí dle ( 5.4.15) a ( 5.4.20):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny: 
$$\sigma_{c,0,d} = \frac{130,37}{152000 \cdot 10^{-3}} = 0,86 \text{ MPa}$$

Návrhové napětí v ohybu: 
$$\sigma_{m,y,d} = \frac{8,56}{9,63 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,89 \text{ MPa}$$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka: 
$$L_{cr,z} = 27900 \text{ mm}$$

Štíhlostní poměr: 
$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{27900}{115,47} = 241,62$$

Poměrný štíhlostní poměr: 
$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{241,62}{\pi} \sqrt{\frac{24}{9400}} = 3,886$$

Součinitel  $k_z$ : 
$$k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,1(3,886 - 0,3) + 3,886^2)$$
  
$$k_z = 8,231$$

Součinitel  $k_{cz}$ : 
$$k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{8,231 + \sqrt{8,231^2 - 3,886^2}} = 0,065$$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$
$$\frac{0,86}{0,065 \cdot 17,28} + 0,7 \frac{0,89}{17,28} + 0 \leq 1$$
$$0,77 + 0,04 \leq 1$$
$$0,80 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### ***Dolní pás***

Rozměry dolních pásů byly vzhledem k nízkým hodnotám vnitřních sil navrženy konstrukčně. Prvky jsou navrženy z rostlého dřeva třídy C24 o rozměrech 100/250. Nejnepříznivějším posudkem pro dolní pás je únosnost ve vzpěrném tlaku v kombinaci s ohybem a kombinace tahu s ohybem.



### - Průřezové charakteristiky

Plocha:  $A = b \cdot h = 100 \cdot 250 = 25000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 1,04 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 4,17 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 1,30 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

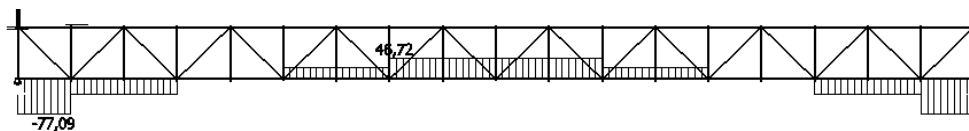
$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 2,08 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 72,17 \text{ mm}$

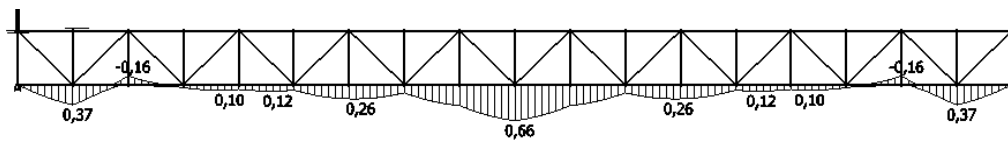
$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 28,87 \text{ mm}$$

### Vnitřní síly:

Normálová síla:  $N_{\text{Ed,max-}} = 77,09 \text{ kN}$   $N_{\text{Ed,max+}} = 46,72 \text{ kN}$



Ohybový moment:  $M_{\text{Ed,přísl}} = 0,37 \text{ kN}$   $M_{\text{Ed,přísl}} = 0,66 \text{ kN}$



Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.15) a ( 5.4.20):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{46,72}{25000 \cdot 10^{-3}} = 1,87 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{77,06}{25000 \cdot 10^{-3}} = 3,08 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu příslušné k tahu:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{0,66}{1,04 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,63 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu příslušné k tlaku:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{0,37}{1,04 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,36 \text{ MPa}$$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:

$$L_{cr,z} = 1550 \text{ mm}$$

Štíhlostní poměr:

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{1550}{28,87} = 53,69$$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{53,69}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,910$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,910 - 0,3) + 0,910^2)$

$$k_z = 0,976$$

Součinitel  $k_{cz}$ :

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,976 + \sqrt{0,976^2 - 0,910^2}} = 0,754$$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{3,0}{0,754 \cdot 14,54} + 0,7 \frac{0,36}{16,62} + 0 \leq 1$$

$$0,28 + 0,01 \leq 1$$

$$0,30 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24)  
( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,87}{9,69} + \frac{0,36}{16,62} + 0 \leq 1$$

$$0,19 + 0,04 + 0 \leq 1$$

$$0,23 \leq 1$$

**Tabulkové posouzení ostatních prvků**

Prvek	Nejnepříznivější posudek	Vnitřní síly	Návrhové napětí [MPa]	$k_{c,y}$	Jednotkový posudek
Sloupky 80/80	Vzpěrný tlak	$N_{Ed,max} = 21,49 \text{ kN}$	$\sigma_{c,0,d} = 3,36 \text{ MPa}$	0,614	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} \leq 1$ $0,38 \leq 1$
Diagonály 80/80	Vzpěrný tlak	$N_{Ed,max} = 21,49 \text{ kN}$	$\sigma_{c,0,d} = 4,68 \text{ MPa}$	0,345	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} \leq 1$ $0,93 \leq 1$

OZNAČENÍ	POPIS	TŘÍDA	ROZMĚRY ŠÍŘKA/VÝŠKA [mm]	HMOTNOST [kg/m]	CELKOVÁ DÉLKA [m]	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]
HP	horní pás	GL24h	400/380	57,8	55,8	3223
DP	dolní pás	C24	100/250	8,8	55,8	349,1
P	příčník	C24	100/250	8,8	39,9	488,2
S, V	sloupek, diagonála	C24	80/80	2,2	134,651	301,6
CELKOVÁ HMOTNOST:						<b>4362</b>

Tab.č.4: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.2

DVOJICE SVISLÝCH SÍL [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD SVISLÉ SÍLY [mm]	VODOROVNÁ SÍLA [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD VODOROVNÉ SÍLY [m]	KONEČNÝ SVISLÝ PRŮHYB [mm]	TUHOST VE SVISLÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	TUHOST VE VODOROVNÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]
20	5,7	20	133,5	25,8	3,5E+06	1,5E+05

Tab.č.5: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.2

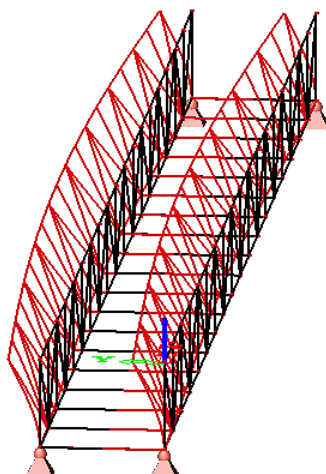
### Modální analýza dle odst. 5.4.3:

POPIS TVARU KMITÁNÍ	POŘADÍ VLASTNÍHO TVARU	FREKVENCE (RUČNÍ VÝPOČET) [Hz]	FREKVENCE (SCIA ENGINEER) [Hz]	MINIMÁLNÍ FREKVENCE [Hz]		OVĚŘENÍ POHODY CHODCŮ
Svislé	9.	6,80	6,85	>	5	Není nutné
Vodorovné i (z části torzní)	1.	1,41	0,94	<	2,5	Je nutné
Torzní	10.	-	7,05	>	2,5	Není nutné

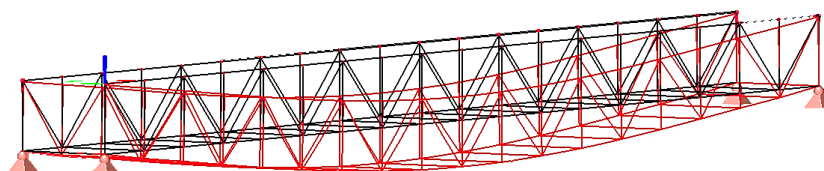
Tab.č.6: Výsledky modální analýzy varianty č. 2

### Tvary vlastního kmitání:

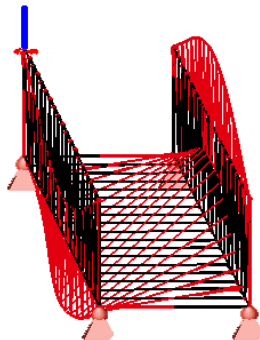
- vodorovné (z části torzní) kmitání (0,94 Hz) – 1. vlastní tvar



- svislé kmitání (6,85 Hz) – 9. vlastní tvar



- kroutivé kmitání (7,05 Hz) – 10. vlastní tvar



#### 5.5.2.4 Varianta č.3

U varianty třetí dochází k překročení prvního mezního stavu únosnosti dříve, než mezního stavu použitelnosti stejně jak u varianty č. 2. Snahou bylo navrhnout průřezy na maximální možné využití. Kritickým posudkem je opět vzpěrný tlak v kombinaci s ohybem.

Použité průřezy jsou sepsány v tabulce č.7. Celková hmotnost konstrukce činí 1793,6 kg. V tabulce č.8 jsou sepsány hodnoty tuhostí ve svislém a vodorovném směru. V tabulce č.9 jsou sepsány výsledky modální analýzy. Výpočet celkové hmotnosti materiálu, jeho výpis a modální analýza byla provedena pomocí programu Scia Engineer 2014.

#### Posouzení prvků konstrukce varianty č.3

##### *Horní pás*

Horní pásy jsou z rostlého dřeva třídy C24. Rozměry prvku byly navrženy o velikosti 110/250 mm. Kritickým posudkem pro horní pás je únosnost ve vzpěrném tlaku v kombinaci s ohybem.

##### *- Průřezové charakteristiky*

Plocha:  $A = b \cdot h = 110 \cdot 250 = 27500 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 1,15 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 5,04 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 1,43 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

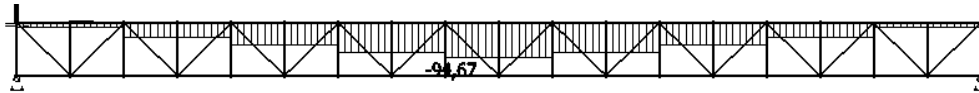
$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 2,77 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 72,17 \text{ mm}$

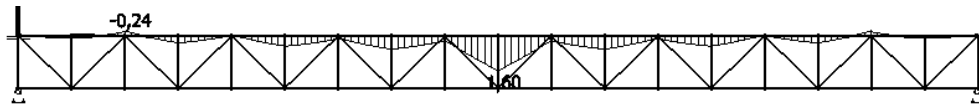
$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 31,75 \text{ mm}$$

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 94,67 \text{ kN}$



Ohybový moment:  $M_{Ed,max} = 1,6 \text{ kN}$



*Návrhová napětí dle ( 5.4.15) a ( 5.4.20):*

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{94,67}{27500 \cdot 10^{-3}} = 3,44 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{1,6}{1,15 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,4 \text{ MPa}$

*Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:*

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 3100 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{3100}{31,75} = 97,62$

Poměrný štíhlostní poměr:  $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{97,62}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 1,655$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(1,655 - 0,3) + 1,655^2)$

$$k_z = 2,006$$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,006 + \sqrt{2,006^2 - 1,655^2}} = 0,319$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{3,44}{0,319 \cdot 14,54} + 0,7 \frac{1,4}{16,62} + 0 \leq 1$$

$$0,74 + 0,06 + 0 \leq 1$$

$$0,80 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### ***Dolní pás***

Rozměry dolních pásů byly vzhledem k nízkým hodnotám vnitřních sil navrženy konstrukčně. Prvky jsou navrženy z rostlého dřeva třídy C24 o rozměrech 100/250. Nejnepříznivějším posudkem pro dolní pás je únosnost v tahu v kombinaci s ohybem.

- *Průřezové charakteristiky*

Plocha:  $A = b \cdot h = 100 \cdot 250 = 25000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 1,04 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 4,17 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 1,30 \cdot 10^8 \text{ mm}^3$

$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 2,08 \cdot 10^8 \text{ mm}^3$$

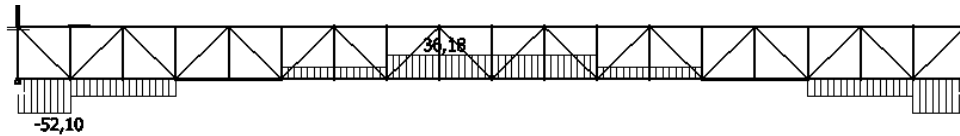
Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 72,17 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 28,87 \text{ mm}$$

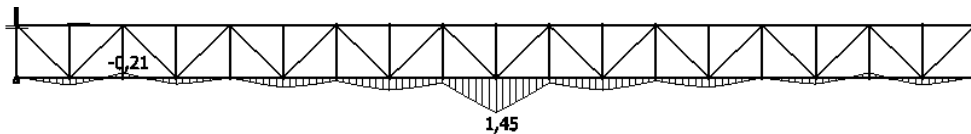


*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max+} = 36,18 \text{ kN}$



Ohybový moment:  $M_{Ed,přísl} = 1,45 \text{ kN}$



*Návrhová napětí dle ( 5.4.13),( 5.4.15) a ( 5.4.20):*

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{36,18}{25000 \cdot 10^{-3}} = 1,45 \text{ MPa}$$

Návrhové napětí v ohybu příslušné k tlaku:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{1,45}{1,04 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,39 \text{ MPa}$$

*Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:*

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,45}{9,69} + \frac{1,39}{16,62} + 0 \leq 1$$

$$0,15 + 0,08 + 0 \leq 1$$

$$0,23 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

**Tabulkové posouzení ostatních prvků**

Prvek	Nejnepříznivější posudek	Vnitřní síly	Návrhové napětí [MPa]	$k_{c,y}$	Jednotkový posudek
Sloupky 80/80	Vzpěrný tlak	$N_{Ed,max} = 12,72 \text{ kN}$	$\sigma_{c,0,d} = 1,99 \text{ MPa}$	0,614	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} \leq 1$ $0,22 \leq 1$
Diagonály 70/70	Vzpěrný tlak	$N_{Ed,max} = 18,56 \text{ kN}$	$\sigma_{c,0,d} = 3,79 \text{ MPa}$	0,271	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} \leq 1$ $0,96 \leq 1$

OZNAČENÍ	POPIS	TŘÍDA	ROZMĚRY ŠÍŘKA/VÝŠKA [mm]	HMOTNOST [kg/m]	CELKOVÁ DÉLKA [m]	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]
HP	horní pás	C24	110/250	9,6	55,8	537,1
DP	dolní pás	C24	100/250	8,8	55,8	488,2
P	příčník	C24	100/250	8,8	39,9	436,6
D	diagonála	C24	70/70	1,7	77,651	133,2
V,S	sloupek	C24	80/80	2,2	57,0	127,7
V	vzpěry	C24	80/80	2,2	31,623	70,8
CELKOVÁ HMOTNOST:						1793,6

Tab.č.7: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.3

DVOJICE SVISLÝCH SÍL [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD SVISLÉ SÍLY [mm]	VODOROVNÁ SÍLA [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD VODOROVNÉ SÍLY [m]	KONEČNÝ SVISLÝ PRŮHYB [mm]	TUHOST VE SVISLÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	TUHOST VE VODOROVNÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]
20	12,3	20	431,4	30,6	1,6E+06	4,6E+04

Tab.č.8: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.3

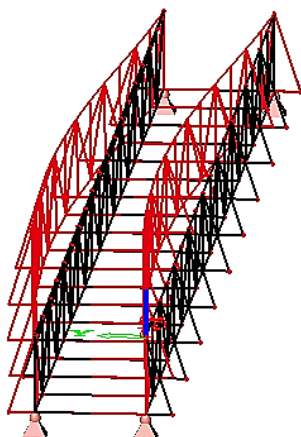
### Modální analýza dle odst. 5.4.3:

POPIS TVARU KMITÁNÍ	POŘADÍ VLASTNÍHO TVARU	FREKVENCE (RUČNÍ VÝPOČET) [Hz]	FREKVENCE (SCIA ENGINEER) [Hz]	MINIMÁLNÍ FREKVENCE [Hz]		OVĚŘENÍ POHODY CHODCŮ
Svislé	1.	7,17	7,20	>	5	Není nutné
Vodorovné (z části torzní)	6.	1,30	1,26	<	2,5	Je nutné
Torzní	4.	-	6,28	>	2,5	Není nutné

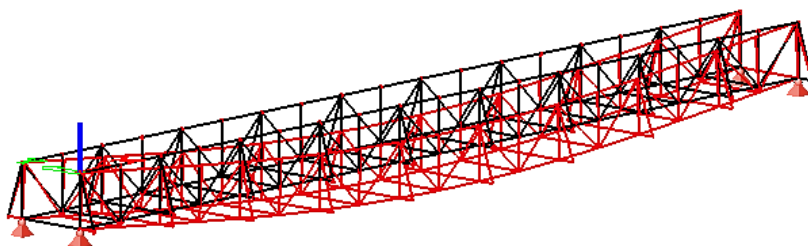
Tab.č.9: Výsledky modální analýzy varianty č. 2

### Tvary vlastního kmitání:

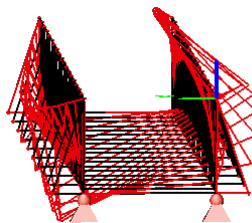
- vodorovné (z části torzní) kmitání (1,26 Hz) – 1. vlastní tvar



- svislé kmitání (7,20 Hz) – 6. vlastní tvar



- kroutivé kmitání (6,28 Hz) – 4. vlastní tvar



#### 5.5.2.5 Varianta č.4

U této architektonicky zajímavé varianty v podobě prostorového příhradového nosníku docházelo k porušení mezního stavu únosnosti dříve než mezního stavu použitelnosti.

Použité průřezy jsou sepsány v tabulce č.10. Celková hmotnost konstrukce činí 869 kg. V tabulce č.11 jsou sepsány hodnoty tuhostí ve svislém a vodorovném směru. V tabulce č.12 jsou sepsány výsledky modální analýzy. Výpočet celkové hmotnosti materiálu, jeho výpis a modální analýza byla provedena pomocí programu Scia Engineer 2014.

#### Posouzení prvků konstrukce varianty č.4

##### *Horní pás*

Horní pásy jsou navrženy z rostlého dřeva třídy C24. Rozměry prvku byly navrženy o velikosti 100/150 mm. Kritickým posudkem pro horní pás je únosnost ve vzpěrném tlaku v kombinaci s ohybem.

##### *- Průřezové charakteristiky*

Plocha:  $A = b \cdot h = 100 \cdot 150 = 15000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 3,75 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 2,81 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

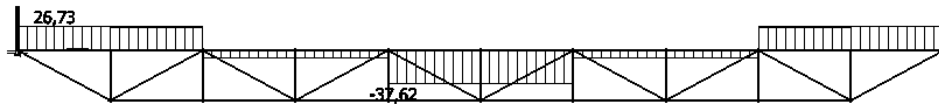
$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 1,25 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 43,30 \text{ mm}$

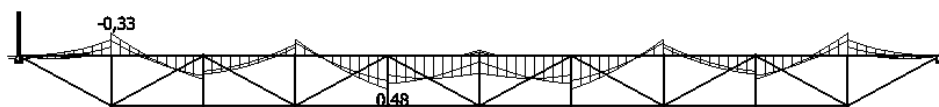
$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 28,87 \text{ mm}$$

Vnitřní síly:

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 37,62 \text{ kN}$



Ohybový moment:  $M_{Ed,max} = 0,48 \text{ kN}$



Návrhová napětí dle ( 5.4.15) a ( 5.4.20):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{37,62}{15000 \cdot 10^{-3}} = 2,51 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{0,48}{3,75 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 1,28 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 2790 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2790}{28,87} = 96,65$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{96,65}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 1,639$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(1,639 - 0,3) + 1,639^2)$

$$k_z = 1,977$$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,977 + \sqrt{1,977^2 - 1,639^2}} = 0,324$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{2,51}{0,324 \cdot 14,54} + 0,7 \frac{1,28}{16,62} + 0 \leq 1$$

$$0,53 + 0,05 \leq 1$$

$$0,59 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### ***Dolní pás***

Prvky jsou navrhnuty z rostlého dřeva třídy C24 o rozměrech 110/150. Nejnepříznivějším posudkem pro dolní pás je únosnost v tahu v kombinaci s ohybem.

#### ***- Průřezové charakteristiky***

Plocha:  $A = b \cdot h = 110 \cdot 150 = 16500 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 4,13 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 3,03 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 3,09 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 1,66 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 43,30 \text{ mm}$

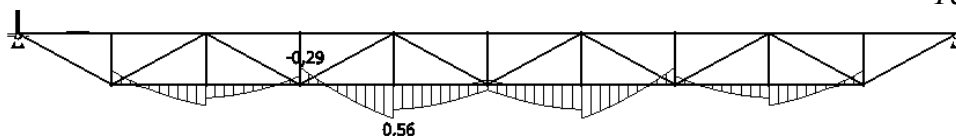
$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 31,75 \text{ mm}$$

#### ***Vnitřní síly:***

Normálová síla:  $N_{Ed, \max} = 137,45 \text{ kN}$



Ohybový moment:  $M_{Ed, \text{přísl}} = 0,56 \text{ kN}$



Návrhová napětí dle ( 5.4.13),( 5.4.15) a ( 5.4.20):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{137,45}{16500 \cdot 10^{-3}} = 8,33 \text{ MPa}$$

Návrhové napětí v ohybu příslušné k tahu:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{0,56}{4,13 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 1,36 \text{ MPa}$$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{8,33}{9,69} + \frac{1,36}{16,62} + 0 \leq 1$$

$$0,86 + 0,08 + 0 \leq 1$$

$$0,94 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### Tabulkové posouzení ostatních prvků

Prvek	Nejnepříznivější posudek	Vnitřní síly	Návrhové napětí [MPa]	$k_{c,y}$	Jednotkový posudek
Diagonály 90/90	Vzpěrný tlak	$N_{Ed,max} = 20,83 \text{ kN}$	$\sigma_{c,0,d} = 2,52 \text{ MPa}$	0,192	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1$ $0,92 \leq 1$
Příčné prvky 90/90	Vzpěrný tlak	$N_{Ed,max} = 18,96 \text{ kN}$	$\sigma_{c,0,d} = 2,34 \text{ MPa}$	0,442	$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1$ $0,36 \leq 1$

OZNAČENÍ	POPIS	TŘÍDA	ROZMĚRY ŠÍŘKA/VÝŠKA [mm]	HMOTNOST [kg/m]	CELKOVÁ DÉLKA [m]	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]
HP	horní pás	C24	100/150	5,2	55,8	292,9
DP	dolní pás	C24	110/150	5,8	22,32	128,9
P	příčné prvky + diagonály	C24	90/90	2,8	157,721	447,1
CELKOVÁ HMOTNOST:						869

Tab.č.10: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.4

DVOJICE SVISLÝCH SIL [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD SVISLÉ SÍLY [mm]	VODOROVNÁ SÍLA [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD VODOROVNÉ SÍLY [m]	KONEČNÝ SVISLÝ PRŮHYB [mm]	TUHOST VE SVISLÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	TUHOST VE VODOROVNÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]
20	29,6	20	12,5	55,1	6,8E+05	1,7E+06

Tab.č.11: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.4

#### Modální analýza dle odst. 5.4.3:

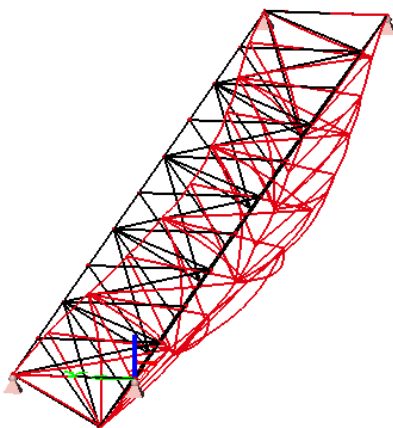
POPIS TVARU KMITÁNÍ	POŘADÍ VLASTNÍHO TVARU	FREKVENCE (RUČNÍ VÝPOČET) [Hz]	FREKVENCE (SCIA ENGINEER) [Hz]	MINIMÁLNÍ FREKVENCE [Hz]		OVĚŘENÍ POHODY CHODCŮ
Svislé	1.	6,25	6,27	>	5	Není nutné
Vodorovné (z části torzní)	2.	12,16	11,80	>	2,5	Není nutné
Torzní (z části vodorovné)	3.	-	14,14	>	2,5	Není nutné

Tab.č.12: Výsledky modální analýzy varianty č. 4

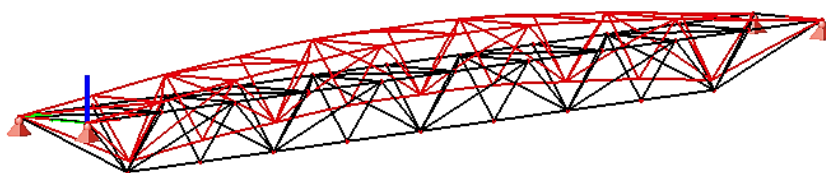


### Tvary vlastního kmitání:

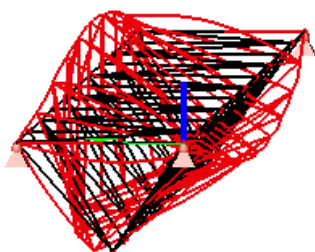
- vodorovné (z části torzní) kmitání (11,80 Hz) – 2. vlastní tvar



- svislé kmitání (6,27 Hz) – 1. vlastní tvar



- kroutivé (z části vodorovné) kmitání (14,14 Hz) – 3. vlastní tvar



#### 5.5.2.6 Varianta č.5

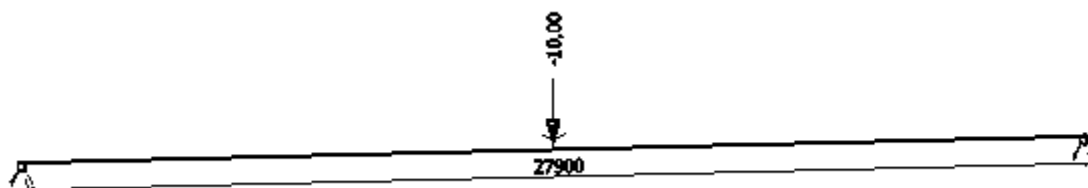
Slabinou lanových konstrukcí je jejich velký průhyb. Pro limitní hodnotu průhybu byl vzat v úvahu maximální možný sklon vhodný pro osoby s omezenou schopností pohybu a orientace. Byla ověřena i únosnost navržených lan na tah. Pro otestování, zda zadané funkcionality na numerickém modelu fungují správně, bylo ručně ověřeno na jednoduchém příkladu. Byly srovnány průhyby a vnitřní síly na laně. Příklad je rozepsán níže.

Použité průřezy jsou sepsány v tabulce č. 13. Celková hmotnost konstrukce činí 5262,7 kg (i s mostovkou). V tabulce č.14 jsou sepsány hodnoty tuhostí ve svislém a vodorovném směru. V tabulce č.15 jsou sepsány výsledky modální analýzy. Výpočet celkové

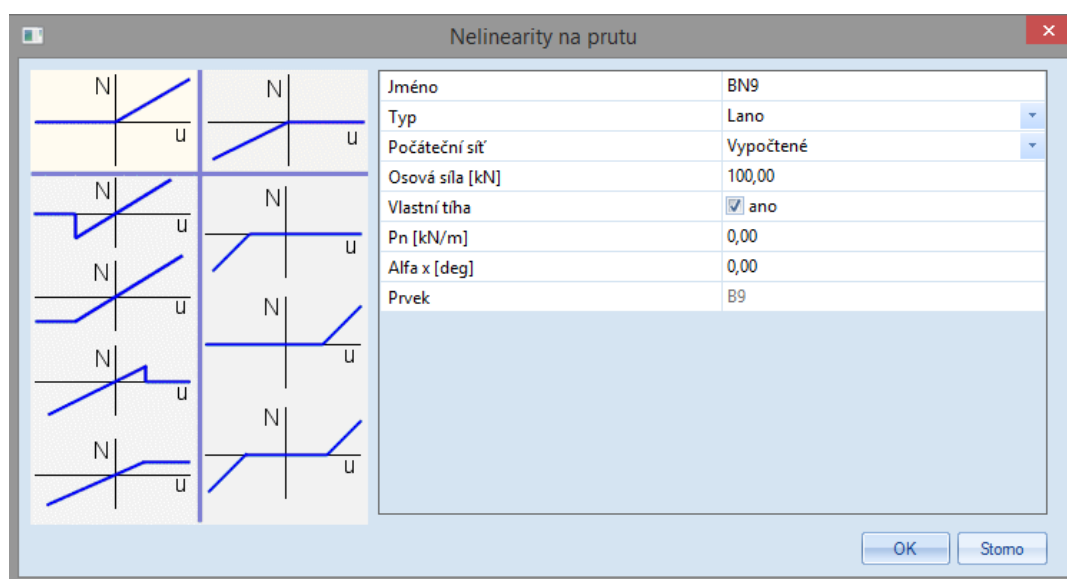
hmotnosti materiálu, jeho výpis a modální analýza byla provedena pomocí programu Scia Engineer 2014.

- Ověření správnosti zadaných funkcionalit na konstrukci**

Na obr. č. 61 je zobrazeno statické schéma konstrukce pro potřeby ověření. Uprostřed rozpětí byla aplikována síla o velikosti 10 kN. Na následujícím obrázku č. 62 je patrné zadání nelinearit. Jako typ prutu bylo zvoleno lano a předepsána předpínací síla o velikosti celkem 100 kN.



Obr. č. 61: Statické schéma kontrolního příkladu



Nelinearity na prutu	
Jméno	BN9
Typ	Lano
Počáteční síť	Vypočtené
Osová síla [kN]	100,00
Vlastní tíha	<input checked="" type="checkbox"/> ano
Pn [kN/m]	0,00
Alfa x [deg]	0,00
Prvek	B9

Obr. č. 62: Zadání nelinearity na prut typu lano v programu Scie Engineer 2014

## Materiál

Poloměr lana:  $r = 10 \text{ mm}$

Modul pružnosti:  $E = 210\,000 \text{ MPa}$

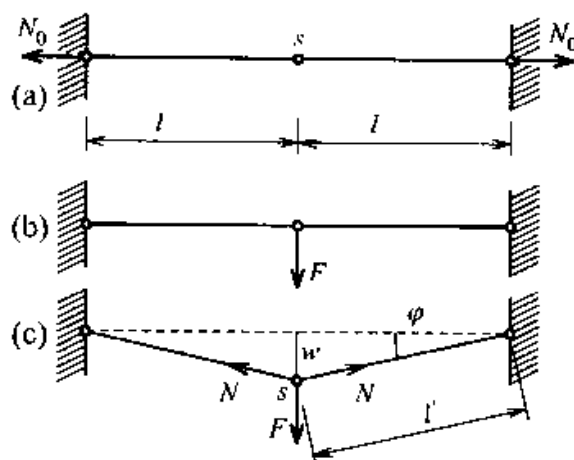
Plocha průřezu lana:  $A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,010^2 = 6,2832 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Konstanta:  $EA = 65973445,73$

Předpínací síla:  $N_0 = 50 \text{ kN}$

Zatížení:  $F = 10 \text{ kN}$

Polovina rozpětí:  $l = 13,95 \text{ m}$



Obr. č. 63: Uspořádání sil [27]

**Výpočet** (postup dle [27])

Dle Hookova zákona platí:

$$\Delta l = \frac{(N - N_0)l}{EA}$$

Z obr. č. 63 vyplývá:

$$\Delta l = l' - l = \frac{l}{\cos \varphi} - l = l \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi}$$

Vyjádření:

$$\Delta l = \frac{(N - N_0)l}{EA} \rightarrow N = \frac{EA}{l} \Delta l + N_0 \dots \text{za } \Delta l \text{ dosadíme vztah z předchozí rovnice}$$

$$N = EA \frac{1 - \cos \varphi}{\cos \varphi} + N_0 \quad (5.5.1)$$

Podmínka rovnováhy ve svislém směru dle teorie II řádu:

$$-2N \sin \varphi + F = 0$$

A nyní za  $N$  dosadíme rovnici (5.5.1):

$$2 \left( EA \frac{1 - \cos \varphi}{\cos \varphi} + N_0 \right) \sin \varphi = F \quad (5.5.2)$$

Jsou-li deformace malé, můžeme uvažovat:  $\sin \varphi \approx \varphi$  (5.5.3)

$$\cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2}$$

Dosazením rovnic (5.5.3) do rovnice (5.5.2) a zanedbáním  $\varphi^2/2$  ve jmenovateli zlomku ve srovnání s 1 dostaneme rovnici.

$$EA\varphi^3 + 2\varphi N_0 = F$$

Pro algebraické řešení vydělením rovnice konstantou EA dostaneme rovnici:

$$\varphi^3 + \frac{2N_0}{EA} \varphi - \frac{F}{EA} = 0$$

Kde:  $\frac{2N_0}{EA} \varphi = \frac{2 \cdot 100 \cdot 10^3}{65973445,73} = 0,0030315$

$$\frac{F}{EA} = \frac{10 \cdot 10^3}{65973445,73} = 0,000151576$$

Dosazením získáme kubickou rovnici:  $\varphi^3 + 0,0030315\varphi - 0,000151576 = 0$

Kořenem rovnice je:  $\varphi = 0,0353851$

Svislý posun:  $w \approx \varphi l = 0,0353851 \cdot 13,95 = 493,6 \text{ mm}$

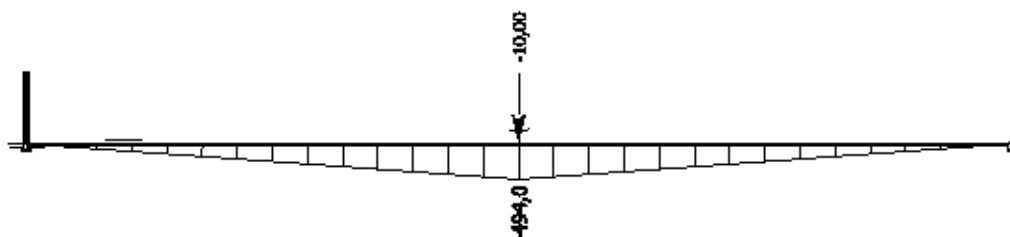
Normálová síla:  $N = EA \frac{1 - \cos \varphi}{\cos \varphi} + N_0$

$$= 2,1 \cdot 10^5 \cdot \pi \cdot 10^2 \cdot \frac{1 - \cos 0,0353851}{\cos 0,0353851} + 100000$$

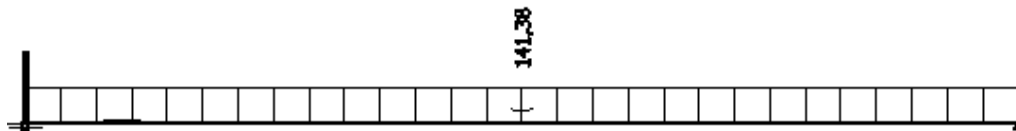
$$N = 141,324 \text{ kN}$$

- **Hodnota průhybu a normálové síly dle programu Scia Engineer 2014:**

PRŮHYB



NORMÁLOVÁ SÍLA:



Z výsledků je patrné, že průhyb i normálová síla ručního výpočtu korespondují s výsledky výpočetního programu a je tedy ověřeno, že nelinearity jsou do numerického modelu zadány správně.

#### • Výpočet únosnosti lana varianty č. 5

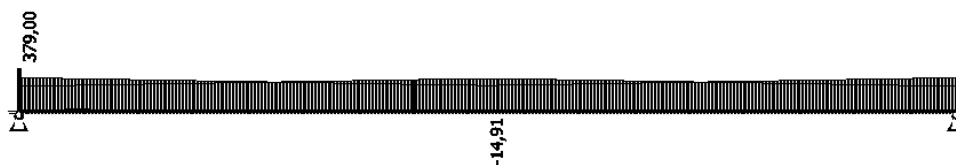
Zatížení přebírají dvě šestipramenná ocelová lana STANDARD 6x19=114 drátů viz obr. č. 64.



Obr. č. 64: Průřez lanem Standard 6x19=114

#### Materiálové charakteristiky lana:

Průměr lana:	$d = 25 \text{ mm}$
Modul pružnosti:	$E = 200\,000 \text{ MPa}$
Pevnost drátů v tahu:	$f_u = 1770 \text{ MPa}$
Jmenovitá únosnost dle výrobce:	$N_{Rd} = 405,7 \text{ kN}$
Návrhová normálová síla:	$N_{Ed,max} = 379 \text{ kN}$



#### Posouzení v tahu:

$$N_{Ed} = 379 \text{ kN} \leq N_{Rd} = 405,7 \text{ kN}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

• **Výpočet průhybu lana varianty č. 5**

Jako limitní hodnota průhybu byl zvolen maximální možný sklon pro osoby s omezenou schopností pohybu a orientace, který činí 1:16. Jedná se o úhel o velikosti 3,58°.

Průhyb od vlastní tíhy:  $w_G = 366,2 \text{ mm}$

Průhyb od síly:  $w_Q = 197,6 \text{ mm}$

Průhyb celkový:  $w_{celk} = 563,8 \text{ mm}$

Průhyb celkový v místě  $x = 1 \text{ m}$ :  $w_{x=1} = 60,3 \text{ mm}$

Maximální pootočení:  $\varphi = 3,56^\circ$  (změřeno v Archicadu 17)

Posouzení průhybu:  $\varphi = 3,56^\circ \leq \varphi_{lim} = 3,58^\circ$

✓✓✓ VYHOVUJE

OZNAČENÍ	TŘÍDA	TŘÍDA	ROZMĚRY ŠÍŘKA/VÝŠKA [mm]	HMOTNOST [kg/m]	CELKOVÁ DÉLKA [m]	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]
M	mostovka	C24	100/250	8,7	588	5145
L	lano	-	Ø25	5,11	55,8	117,7
CELKOVÁ HMOTNOST:						5262,7

Tab. č. 13: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.5

DVOJICE SVISLÝCH SÍL [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD SVISLÉ SÍLY [mm]	VODOROVNÁ SÍLA [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD VODOROVNÉ SÍLY [m]	KONEČNÝ CELKOVÝ PRŮHYB [mm]	TUHOST VE SVISLÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	TUHOST VE VODOROVNÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]
20	191	20	20,3	557,2	1,0E+05	9,9E+05

Tab.č.14: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.5

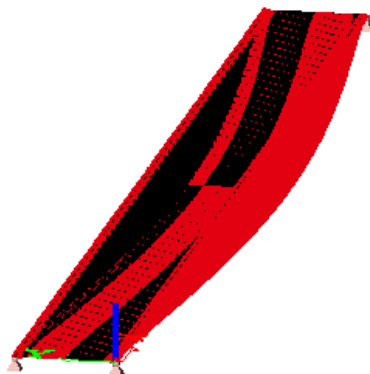
**Modální analýza dle odst. 5.4.3:**

POPIS TVARU KMITÁNÍ	POŘADÍ VLASTNÍHO TVARU	FREKVENCE (RUČNÍ VÝPOČET) [Hz]	FREKVENCE (SCIA ENGINEER) [Hz]	MINIMÁLNÍ FREKVENCE [Hz]		OVĚŘENÍ POHODY CHODCŮ
Svislé	1.	0,91	0,83	<	5	Je nutné
Vodorovné	7.	4,23	4,91	>	2,5	Není nutné
Torzní	5.	-	3,78	>	2,5	Není nutné

Tab.č.15: Výsledky modální analýzy varianty č. 5

### Tvary vlastního kmitání:

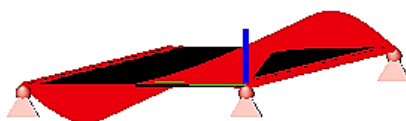
- vodorovné kmitání (4,91 Hz) – 7. vlastní tvar



- svislé kmitání (0,83 Hz) – 1. vlastní tvar



- kroutivé kmitání (3,78 Hz) – 5. vlastní tvar

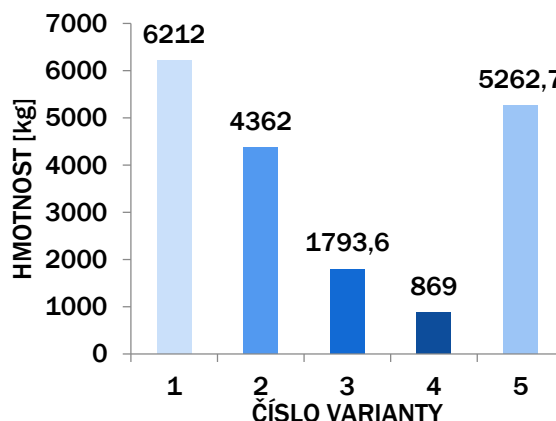


### 5.5.3 Porovnání variant pro rozpětí 27,9 m

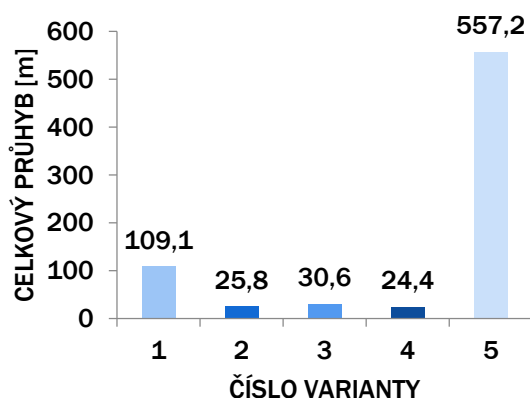
Konstrukční systémy variant byly vzájemně porovnávány z hlediska celkové hmotnosti konstrukce, jeho vlastností z hlediska tuhosti a dynamiky. Pro potřeby vzájemného porovnání, musely všechny konstrukce vyhovět prvnímu i druhému meznímu stavu, s tím, že snahou bylo dosáhnout maximálního možného využití prvků. Pro první tři varianty byly zvoleny identické rozměry příčníků.

### 5.5.3.1 Porovnání variant z hlediska hmotnosti a celkového svislého průhybu

ČÍSLO VARIANTY	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]	POŘADÍ
VARIANTA Č. 1	6212	5
VARIANTA Č. 2	4362	3
VARIANTA Č. 3	1793,6	2
VARIANTA Č. 4	869	1
VARIANTA Č. 5	5262,7	4

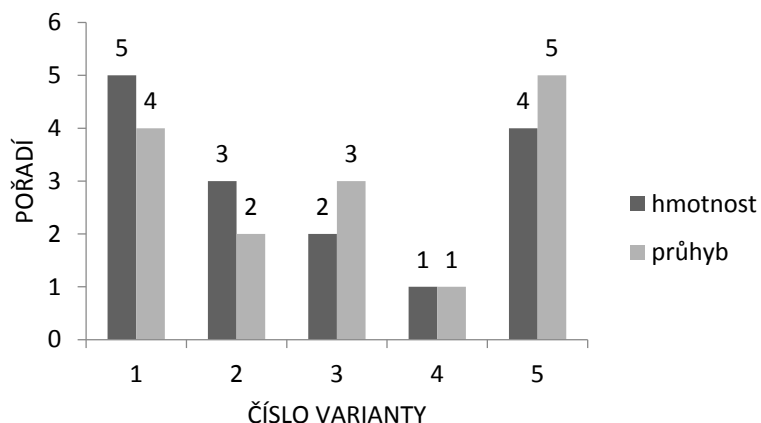


ČÍSLO VARIANTY	CELKOVÁ HMOTNOST [kg]	POŘADÍ
VARIANTA Č. 1	109,1	4
VARIANTA Č. 2	25,8	2
VARIANTA Č. 3	30,6	3
VARIANTA Č. 4	24,4	1
VARIANTA Č. 5	557,2	5



Následující graf č. 1 znázorňuje pořadí z hlediska kritéria hmotnosti a celkového průhybu. Je z něj patrné, že nejvýhodnější z hlediska průhybu a hmotnosti konstrukce je varianta č. 4. O druhé a třetí místo se dělí varianta č. 2 a č. 3. Větší váhu však přikláním k hmotnosti konstrukce ovlivňující celkovou cenu díla a řadím tedy variantu č. 3 na místo druhé a variantu č. 2 na místo třetí. Poslední místa jsou opět nerozhodně. Varianta č. 1 a č. 5 disponují velkou hmotností a z ní vyplývající nepříznivým průhybem. U varianty č. 5 je však konstrukce modelována i s mostovkou pro zajištění příčné tuhosti a spolupůsobení lan, která tvoří převážnou část hmotnosti konstrukce. Hmotnost samotných nosných lan je však velmi nízká a při nárůstu zatížení lze předpokládat, že celková hmotnost již dále rapidně neporoste na rozdíl od ostatních variant. Navíc průhyb u lanové konstrukce není zcela nežádoucí. Dodává konstrukci historický nádech klasické lanové konstrukce a nenarušuje krajinný ráz horské oblasti.

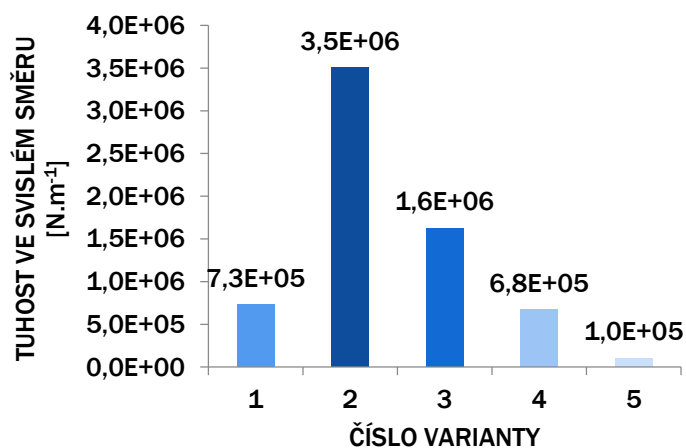




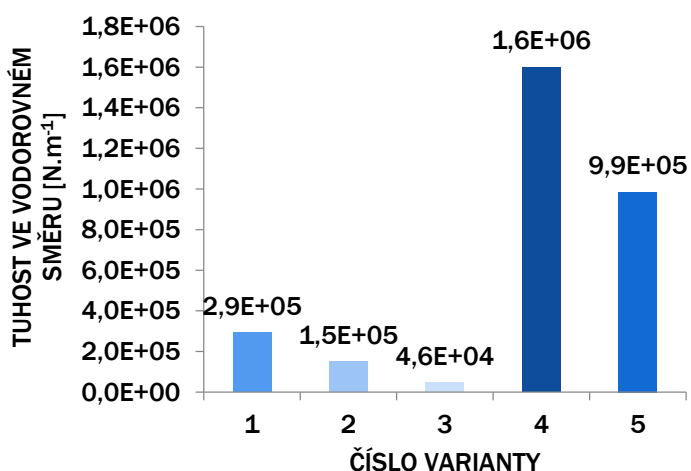
Graf č. 1: Pořadí variant z hlediska hmotnosti a průhybu

### 5.5.3.2 Porovnání variant z hlediska svislé a vodorovné tuhosti

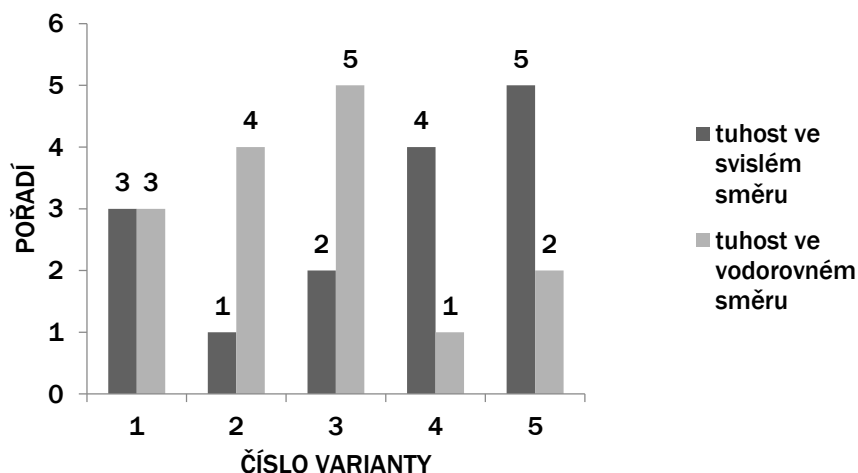
ČÍSLO VARIANTY	TUHOST VE SVISLÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	POŘADÍ
VARIANTA Č. 1	7,3E+05	3.
VARIANTA Č. 2	3,5E+06	1.
VARIANTA Č. 3	1,6E+06	2.
VARIANTA Č. 4	6,8E+05	4.
VARIANTA Č. 5	1,0E+05	5.



ČÍSLO VARIANTY	TUHOST VE VODOROVNÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	POŘADÍ
VARIANTA Č. 1	2,9E+05	3.
VARIANTA Č. 2	1,5E+05	4.
VARIANTA Č. 3	4,6E+04	5.
VARIANTA Č. 4	1,6E+06	1.
VARIANTA Č. 5	9,9E+05	2.



Následující graf č. 2 znázorňuje pořadí vzhledem k tuhosti ve svislém a vodorovném směru. Je patrné, že je-li konstrukce tuhá ve směru svislém, pokulhává její tuhost ve směru vodorovném a naopak. Výjimkou je varianta č. 1, jejíž tuhosti v obou směrech jsou přibližně na stejné úrovni. Nejlepší variantou týkající se tuhosti ve směru vodorovném je varianta č.4. Ve směru svislém pak varianta č. 2. Naopak nejhorší tuhostní vlastnosti ve směru vodorovném má varianta č. 3, ve směru svislém pak varianta č. 5. Důležitým faktorem ke konečnému zhodnocení je však vzájemný poměr hmotnosti k tuhosti. To nám řekne více o výhodnosti daného konstrukčního systému. Porovnání z hlediska poměru hmotnosti k tuhosti je obsahem odst. č. 5.5.3.3.

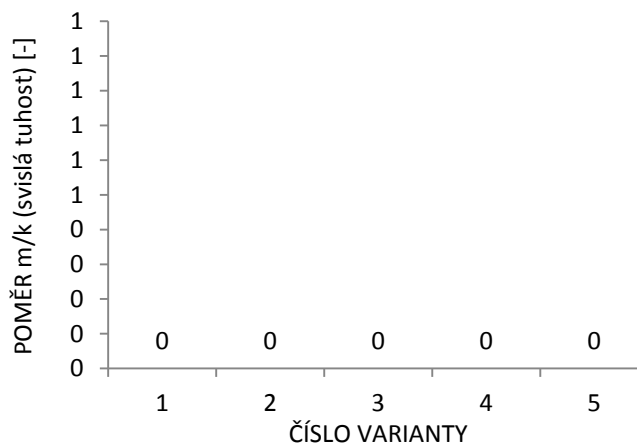


Graf č. 2: Pořadí variant z hlediska tuhosti ve svislém a vodorovném směru

### 5.5.3.3 Porovnání variant z hlediska poměru hmotnosti k tuhosti

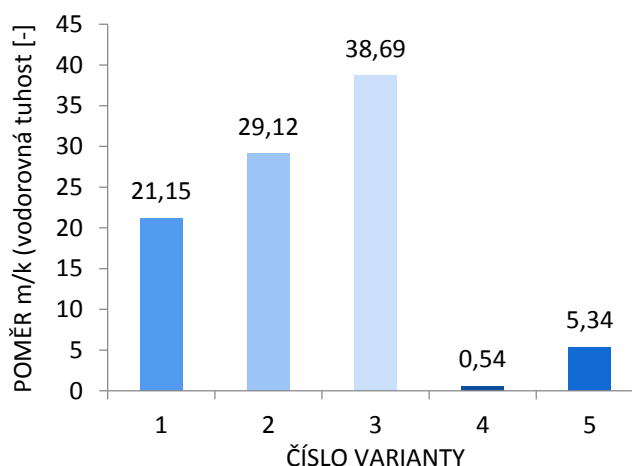
- Ve svislém směru

ČÍSLO VARIANTY	POMĚR m/k [-]	POŘADÍ
VARIANTA Č. 1	8,54	4.
VARIANTA Č. 2	1,24	2.
VARIANTA Č. 3	1,10	1.
VARIANTA Č. 4	1,29	3.
VARIANTA Č. 5	50,26	5.

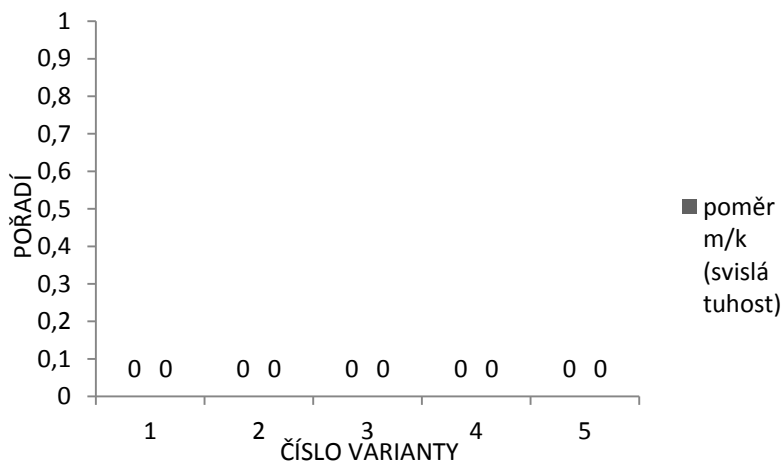


- Ve vodorovném směru

ČÍSLO VARIANTY	POMĚR m/k [-]	POŘADÍ
VARIANTA Č. 1	21,15	3
VARIANTA Č. 2	29,12	4
VARIANTA Č. 3	38,69	5
VARIANTA Č. 4	0,54	1
VARIANTA Č. 5	5,34	2



Graf č. 3 znázorňuje pořadí poměrů mezi hmotností k svislé respektive vodorovné tuhosti. Vzájemný poměr hmotnosti k tuhosti je důležitým faktorem ke konečnému zhodnocení. Máme-li konstrukční systém relativně lehký a zároveň dostatečně tuhý, lze hovořit o konstrukčním systému ve své podstatě nejvýhodnějším a je prakticky systémem hledaným. Tyto podmínky nejlépe splňuje konstrukční systém varianty č. 4.



Graf č. 3: Pořadí variant z hlediska poměru hmotnosti k tuhosti

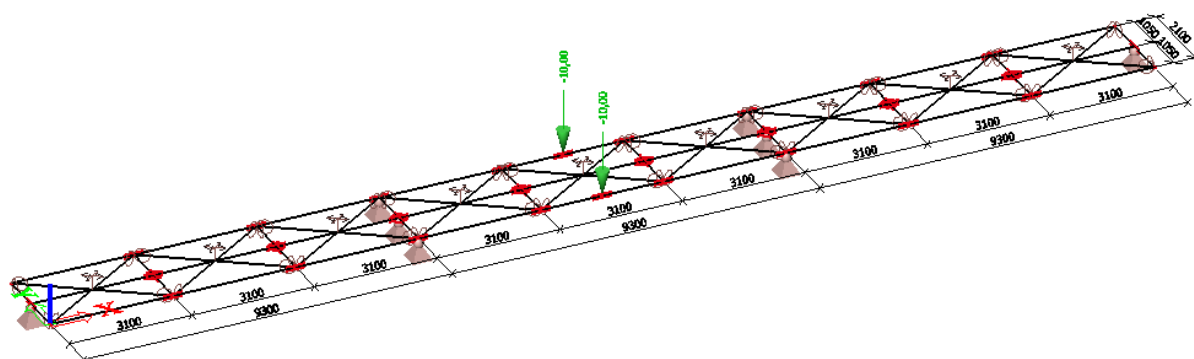
#### 5.5.4 Shrnutí dynamických vlastností variant

V následující tabulce je soupis vlastních frekvencí s popisem tvarů kmitání všech variant s vyznačením nejvýhodnější varianty z hlediska dynamiky. Tou je varianta č.4.

Číslo varianty	Popis tvaru kmitání	Pořadí vlastního tvaru	Frekvence f (ruční výpočet) [Hz]	Frekvence f (Scia Engineer) [Hz]	Minimální frekvence [Hz]		Ověření pohody chodců
Varianta č. 1	Svislé	2.	2,43	2,46	<	5	Je nutné
	Vodorovné	1.	1,59	1,58	<	2,5	Je nutné
	Torzní	3.	-	2,52	>	2,5	Není nutné
Varianta č. 2	Svislé	9.	6,80	6,85	>	5	Není nutné
	Vodorovné i torzní	1.	1,41	0,94	<	2,5	Je nutné
	Torzní	10.	-	7,05	>	2,5	Není nutné
Varianta č. 3	Svislé	6.	7,17	7,20	>	5	Není nutné
	Vodorovné i torzní	1.	1,30	1,26	<	2,5	Je nutné
	Torzní	4.	-	6,28	<	2,5	Není nutné
Varianta č. 4	Svislé	1.	6,25	6,27	>	5	Není nutné
	Vodorovné (z části torzní)	2.	12,60	11,80	>	2,5	Není nutné
	Torzní (z části vodorovné)	3.	-	14,11	>	2,5	Není nutné
Varianta č. 5	Svislé	1.	0,91	0,83	<	5	Je nutné
	Vodorovné	7.	4,23	4,91	>	2,5	Není nutné
	Torzní	5.	-	3,78	>	2,5	Není nutné

### 5.5.5 Varianta „Lipno“

Pro potřeby variantního řešení byl vymodelován model, jehož statický systém se inspiroval reálně stojící stezkou korunami stromů u Lipna. Dva spojitě podélné nosníky o třech polích z lepeného lamelového dřeva tvoří hlavní nosnou část a jsou vzájemně spojeny pomocí příčníků z oceli S235 průřezu HEB. Konstrukce je ztužena táhly umístěnými křížem mezi jednotlivými příčníky. Pro tyto táhla byly zadány nelinearity na prutu s vyloučením tlaku. Všechny spoje jsou řešeny jako kloubové. MKP model je znázorněn na obr. č. 65.

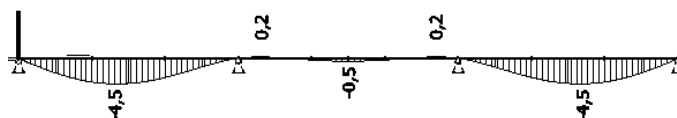


Obr. č. 65: Numerický model varianty u Lipna

U této varianty docházelo k porušení mezního stavu použitelnosti dříve než mezního stavu únosnosti. Byl tedy sledován průhyb podobně jako u varianty č.1 (viz odst. 5.5.2.2).

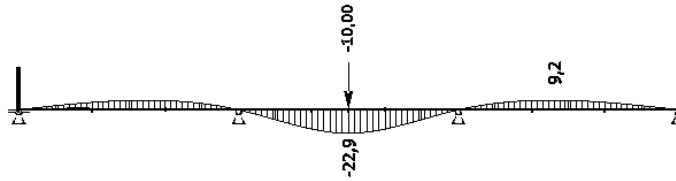
Na obr. č.59 a obr. č.60 je vykreslen okamžitý průhyb od jednotlivých zatěžovacích stavů. Následně je pak uveden výpočet všech potřebných průhybů, které jsou pro konstrukci kritickým posudkem. Použité průřezy jsou sepsány v tabulce č. 16. Celková hmotnost konstrukce činí **2213,3 kg**. V tabulce č. 17 jsou sepsány hodnoty tuhostí ve svislém a vodorovném směru. V tabulce č. 18 jsou sepsány výsledky modální analýzy. Výpočet celkové hmotnosti materiálu, jeho výpis a modální analýza byla provedena pomocí programu Scia Engineer 2014

- **1. ZS:** vlastní tíha



Obr. č. 66: Okamžitý průhyb  $w_{inst,1}$  vyvolaný vlastní tíhou

- 2. ZS: dvojice sil o velikosti 10 kN



Obr. č. 67: Okamžitý průhyb  $w_{inst,2}$  vyvolaný dvojicí sil o velikosti 10 kN

### Ověření průhybů dle (5.4.1) až (5.4.10):

#### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 0,5 + 22,9 = 23,4 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dvojicí sil:

$$w_{inst,Q_1} = 22,9 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{9300}{400} = 23,25 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 23,4 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{9300}{300} = 31 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0,5(1 + 2) = 1,5 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 22,9(1 + 0,2) = 22,9 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} = 1,5 + 22,9 + 0 = 24,4 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 24,4 - 0 = 24,4 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 24,4 \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{9300}{250} = 37,2 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 24,4 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{9300}{150} = 62 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

OZNAČENÍ	TŘÍDA	TŘÍDA	ROZMĚRY ŠÍŘKA/VÝŠKA [mm]	HMOTNOST [kg/m]	CELKOVÁ DÉLKA [m]	HMOTNOST [kg]
HN	hlavní nosník	GL24h	160/300	18,2	55,8	1017,8
PP	podporový příčník	S235	HEB 160	42,6	8,4	357,7
VP	vnitřní příčník	S235	HEB 140	33,7	12,6	424,9
PO	podélník	C24	50/80	1,4	27,9	39,1
T	táhla	S450	Ø30	5,5	67,398	373,8
CELKOVÁ HMOTNOST:						2213,3

Tab. č. 16: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty Lipno

DVOJICE SVISLÝCH SÍL [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD SVISLÉ SÍLY [mm]	VODOROVNÁ SÍLA [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD VODOROVNÉ SÍLY [m]	KONEČNÝ CELKOVÝ PRŮHYB [mm]	TUHOST VE SVISLÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	TUHOST VE VODOROVNÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]
20	22,9	20	4,4	24,4	8,7E+05	4,5E+06

Tab. č. 17: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty Lipno

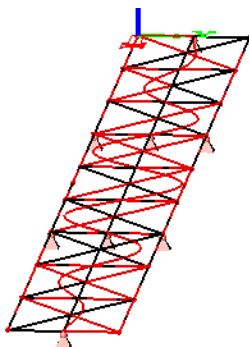
#### Modální analýza dle odst. 5.4.3:

POPIS TVARU KMITÁNÍ	POŘADÍ VLASTNÍHO TVARU	FREKVENCE (SCIA ENGINEER) [Hz]	MINIMÁLNÍ FREKVENCE [Hz]		OVĚŘENÍ POHODY CHODCŮ
Svislé	3.	6,03	<	5	Není nutné
Vodorovné	8.	13,66	<	2,5	Není nutné
Torznní	1.	1,40	>	2,5	Je nutné

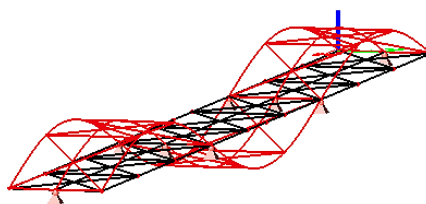
Tab. č. 18: Výsledky modální analýzy varianty Lipno

#### Tvary vlastního kmitání:

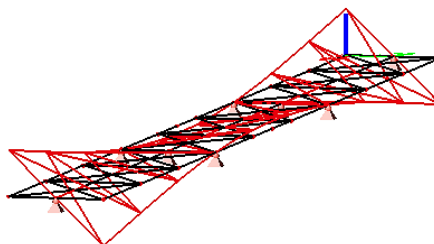
- vodorovné kmitání (13,66 Hz) – 8. vlastní tvar



- svislé kmitání (6,03 Hz) – 3. vlastní tvar



- kroutivé kmitání (1,40 Hz) – 1. vlastní tvar



### 5.5.6 Porovnání variant s vnitřními podporami

Dalším krokem pro vzájemné porovnání bylo opětovné posouzení všech variant (s výjimkou lanové konstrukce) pro případ, kdy vložíme do třetin rozpětí podpory jako je tomu u Lipenské varianty. Konstrukce byly opět redukovány a posouzeny pro MSÚ i MSP (výpočet zde není uveden). Byla také znovu provedena modální analýza každé z variant a výsledky vzájemně porovnány.

#### 5.5.6.1 Shrnutí hodnot výsledků variant s vnitřními podporami

Tabulka č. 19 shrnuje výsledky variant pro případ s vloženými vnitřními podporami v třetinách rozpětí. Lipenská varianta se z hlediska hmotnosti a průhybu nejeví jako příliš výhodná. To je způsobeno především užitím ocelových prvků, které konstrukci zatěžují.

ČÍSLO VARIANTY	DVOJICE SVISLÝCH SÍL [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD SVISLÉ SÍLY [mm]	VODOROVNÁ SÍLA [kN]	OKAMŽITÝ PRŮHYB OD VODOROVNÉ SÍLY [m]	KONEČNÝ CELKOVÝ PRŮHYB [mm]	TUHOST VE SVISLÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	TUHOST VE VODOROVNÉM SMĚRU [N.m <sup>-1</sup> ]	HMOTNOST KONSTRUKCE m <sub>c</sub> [kg]
VARIANTA Č. 1	20	22,7	20	29,7	23,6	8,8E+05	6,7E+05	1366,9
VARIANTA Č. 2	20	1,6	20	133,5	2,8	1,3E+07	1,5E+05	2449,6
VARIANTA Č. 3	20	1,9	20	431,4	2,8	1,1E+07	4,6E+04	1365
VARIANTA Č. 4	20	4,4	20	12,0	8	4,5E+06	1,7E+06	720,6
LIPNO	20	22,9	20	4,4	24,4	8,7E+05	4,5E+06	2213,6

Tab. č. 19: Shrnutí hodnot výsledků variant s vnitřními podporami

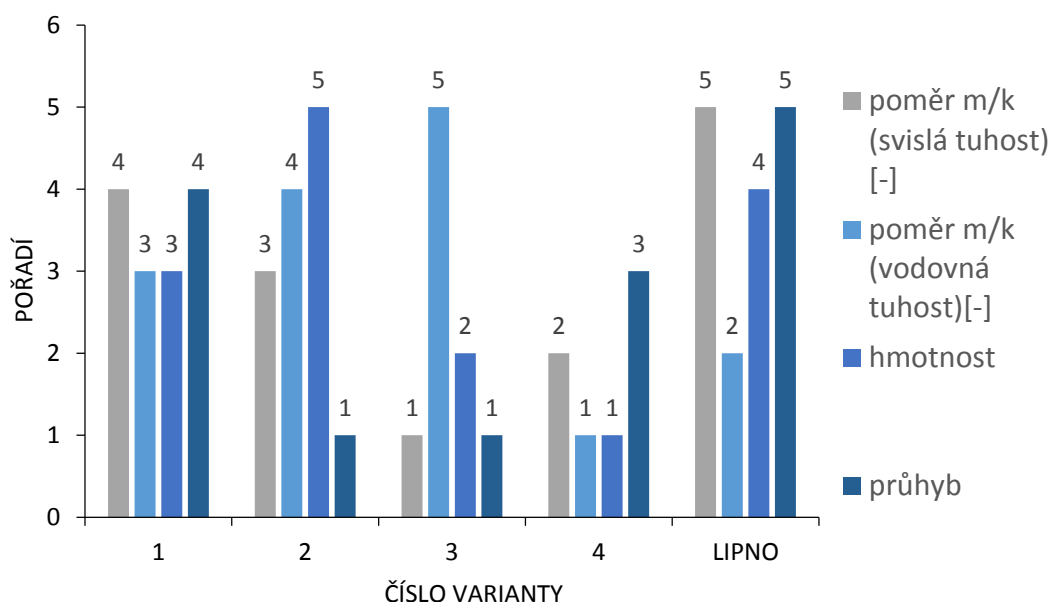


### 5.5.6.2 Poměr mezi hmotnostmi a tuhostí

- Ve svislém směru
- Ve vodorovném směru

ČÍSLO VARIANTY	POMĚR m/k [-]	POŘADÍ
VARIANTA Č. 1	1,55	4
VARIANTA Č. 2	0,20	3
VARIANTA Č. 3	0,13	1
VARIANTA Č. 4	0,16	2
LIPNO	2,53	5

ČÍSLO VARIANTY	POMĚR m/k [-]	POŘADÍ
VARIANTA Č. 1	2,03	3
VARIANTA Č. 2	16,35	4
VARIANTA Č. 3	29,44	5
VARIANTA Č. 4	0,45	1
LIPNO	0,49	2



Graf č. 4: Pořadí variant s vnitřními podporami s ohledem na jednotlivá kritéria

Výsledky potvrzují, že jako nejvýhodnější se jeví opět varianta č.4, která je vzhledem ke své nízké hmotnosti i dostatečně tuhá.

### 5.5.7 Shrnutí dynamických vlastností variant s vnitřními podporami

Tabulka č. 20 shrnuje vlastní frekvence a odpovídající tvar kmitání pro vodorovný, svislý a torzní směr. Evidentní jsou výhodné vlastní frekvence varianty č. 4.

Číslo varianty	Popis tvaru kmitání	Pořadí vlastního tvaru	Frekvence $f$ (Scia Engineer) [Hz]	Minimální frekvence [Hz]		Ověření pohody chodců
Varianta č. 1	Svislé	1.	7,49	>	5	Není nutné
	Vodorovné	2.	7,98	>	2,5	Není nutné
	Torzní	3.	8,42	>	2,5	Není nutné
Varianta č. 2	Svislé	21.	26,68	>	5	Není nutné
	Vodorovné i torzní	1.	0,79	<	2,5	Je nutné
	Torzní	2.	0,80	<	2,5	Není nutné
Varianta č. 3	Svislé	8.	22,02	>	5	Není nutné
	Vodorovné i torzní	1.	4,68	>	2,5	Není nutné
	Torzní	2.	5,49	>	2,5	Není nutné
Varianta č. 4	Svislé	1.	18,02	>	5	Není nutné
	Vodorovné (z části torzní)	2.	18,42	>	2,5	Není nutné
	Torzní (z části vodorovné)	31.	22,78	>	2,5	Není nutné
LIPNO	Svislé	3.	6,03	<	5	Není nutné
	Vodorovné	8.	13,66	>	2,5	Není nutné
	Torzní	1.	1,40	>	2,5	Je nutné

Tab. č. 20: Shrnutí dynamických vlastností variant s vnitřními podporami

### 5.5.8 Porovnání poměru hmotnosti k tuhosti variant s vnitřními podporami a bez podpor

- Ve směru svislém

Číslo varianty	POMĚR $m/k$ [-]		Příznivost [%]
	Bez podpor	S podporami	
Varianta č. 1	8,54	1,55	81,84%
Varianta č. 2	1,24	0,20	84,24%
Varianta č. 3	1,10	0,13	88,24%
Varianta č. 4	1,29	0,16	87,67%

- Ve směru vodorovném

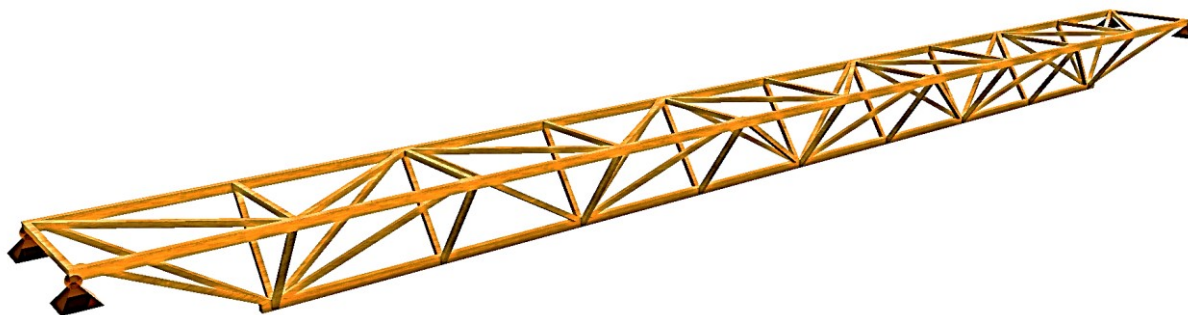
Číslo varianty	POMĚR $m/k$ [-]		Příznivost [%]
	Bez podpor	S podporami	
Varianta č. 1	21,15	2,03	90,40%

Varianta č. 2	29,12	16,35	43,84%
Varianta č. 3	38,69	29,44	23,90%
Varianta č. 4	0,54	0,43	20,39%

Z výsledků je patrné, že poměr  $m/k$ , je pro varianty s vnitřními podporami příznivější a to až o 90%. Použitím vnitřních podpor se však konstrukce prodražuje z důvodu nutnosti dalšího materiálu samotných podpor a zakládání. Rozhraní, kdy je pro konstrukci lávky výhodné aplikovat vnitřní podpory a kde ne, je těžko odhadnutelná a musela by se porovnat na základě podrobného výpočtu a celkových nákladů. Avšak z výsledků lze usuzovat, že aplikace vnitřních podpor je výhodná především pro variantu č. 1.

## 5.6 Závěr k diskuzi o variantách

Vzhledem k dosaženým výsledkům lze považovat variantu č. 4. jako optimální. Jedná se o prostorovou příhradovou konstrukci, jejíž příčný řez tvoří trojúhelník. Tato varianta v porovnání s ostatními je nejlepší z hlediska hmotnosti i z hlediska tuhosti, kterou zajišťuje prostorová příhradová konstrukce. Vzájemný poměr mezi hmotností a tuhostí je sice ve svislém směru až na třetím místě, avšak rozdíl hodnot v porovnání s variantami umístěných na prvním a druhém místě je velmi minimální. Ve směru vodorovném je poměr hmotnosti k tuhosti vybrané varianty nejpříznivější a rozdíl oproti dalším variantám je již patrnější. Varianta č.4 je rovněž příznivá z hlediska dynamiky lávky. V neposlední řadě rozhodlo o výběru varianty č.4 také estetické hledisko, konstrukce je architektonicky zajímavá a netradiční. Mezi významné hledisko při výběru optimální varianty bezesporu patří také trvanlivost a životnost stavby. Trojúhelníkovým tvarem příčného řezu a umístěním mostovky, tvořící „zastřešení“ nosné konstrukce, bude zabráněno přímému kontaktu s vodou. Zároveň vzhledem k možnosti vysokého stupně prefabrikace, lze výrazně urychlit dobu výstavby.



*Obr. č. 68: Konstruktivní systém zvolené varianty*

VŠB-Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra konstrukcí



ČÁST -B-  
Statický výpočet

## 6 Statický výpočet vybrané varianty

### 6.1 Základní údaje

Rozpětí lávky:	27,9 m
Celková délka řešené části konstrukce:	83,7 m
Volná šířka lávky:	2,3 m
Osová vzdálenost horní pásů přehrad:	2,1 m
Výška lávka:	2,175 m
Osová vzdálenost příčníků:	2,79 m
Umístění konstrukce:	Beskydy (vrch Tanečnice 1084 m.n.m.)

Všechny potřebné rozměry lávky jsou uvedeny v příloze ve výkresové části.

### 6.2 Vlastnosti použitých materiálů

Charakteristické hodnoty:

	<b>C24</b>	<b>C30</b>
<i>Pevnost v ohybu:</i>	$f_{m,k} = 24 \text{ MPa}$	$f_{m,k} = 30 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny:</i>	$f_{t,0,k} = 14 \text{ MPa}$	$f_{t,0,k} = 18 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:</i>	$f_{c,0,k} = 21 \text{ MPa}$	$f_{c,0,k} = 23 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tlaku kolmo na vlákna:</i>	$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ MPa}$	$f_{c,90,k} = 2,7 \text{ MPa}$
<i>Pevnost ve smyku:</i>	$f_{v,k} = 4 \text{ MPa}$	$f_{v,k} = 4 \text{ MPa}$
<i>5% kvantil modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny:</i>	$E_{0,05} = 7400 \text{ MPa}$	$E_{0,05} = 8000 \text{ MPa}$
<i>Hustota</i>	$\rho_k = 350 \text{ kg.m}^{-3}$	$\rho_k = 380 \text{ kg.m}^{-3}$
<i>Dílčí součinitel <math>\gamma_M</math></i>	$\gamma_M = 1,3$	$\gamma_M = 1,3$
<i>Modifikační součinitel (dle tab. 3.1 v [7])</i>	$k_{mod} = 0,7$	$k_{mod} = 0,7$

Návrhové hodnoty byly spočteny dle vzorce ( 5.4.12):

**C24** **C30**

<i>Pevnost v ohybu:</i>	$f_{m,d} = 12,92 \text{ MPa}$	$f_{m,k} = 16,15 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny:</i>	$f_{t,0,d} = 7,54 \text{ MPa}$	$f_{t,0,k} = 9,69 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny:</i>	$f_{c,0,d} = 11,31 \text{ MPa}$	$f_{c,0,k} = 12,38 \text{ MPa}$
<i>Pevnost v tlaku kolmo na vlákna:</i>	$f_{c,90,d} = 1,35 \text{ MPa}$	$f_{c,90,k} = 1,45 \text{ MPa}$
<i>Pevnost ve smyku:</i>	$f_{v,d} = 2,15 \text{ MPa}$	$f_{v,k} = 2,15 \text{ MPa}$

## 6.3 Zatížení

Zatížení bylo spočteno dle zásad v [1], [2], [3], [4] a [9]. Bylo uvažováno se zatížením stálým od vlastní tíhy, které bylo generováno programem Scia Engineer automaticky. Jako další stálé bylo uvažováno s tíhou mostin a zábradlí. Proměnné zatížení tvoří zatížení od dopravy. Jedná se o Model zatížení 4, kdy se předpokládá nebezpečí zatížení souvislým proudem lidí. Sestává z rovnoměrného svislého zatížení od chodců o velikosti  $5 \text{ kN/m}^2$ . Charakteristická síla vodorovných sil se má rovnat 10% z celkového zatížení odpovídajícího rovnoměrnému zatížení. U lávek, u kterých je konstrukčně zamezeno vjetí vozidel (např. pevná překážka v místě přístupu na lávku, lávka je úzká) se uvažuje osamělá síla  $Q_{fwk}=2 \text{ kN}$  na roznášecí ploše  $0,1 \times 0,1 \text{ m}$ , což je i případ řešené konstrukce. Bylo uvažováno se zatížením větrem a sněhem jako další proměnná zatížení. V normě [3] zvláštní zatížení sněhem mostů uvedeno není. Dle [74] a [9] se zatížení sněhem na území ČR zpravidla nekombinuje se zatížením větrem a s hlavními modely zatížení dopravou. Uvažuje se s těmito zatíženími pouze u zastřešených lávek. Avšak vzhledem k vysoké charakteristické hodnotě sněhem díky umístění konstrukce v horské oblasti bylo po zvážení situací, které mohou během životnosti konstrukce nastat, uvažováno se zatížením sněhem v kombinaci se stálým zatížením. Byly stanoveny charakteristické hodnoty veškerého zatížení a vytvořeny kombinace s příslušnými součiniteli zatížení dle tabulky A2.4(B) a A2.2 v [9].

### 6.3.1 Zatížení stálá

#### 6.3.1.1 Vlastní tíha

– zatížení vlastní tíhou je automaticky generováno programem Scia Engineer

### 6.3.1.2 Stálé

– zatížení stálé představuje vlastní váhu od mostin a zábradlí

– mostiny

třída:	D40
tloušťka:	$t = 0,08 \text{ m}$
šířka:	$b = 0,15 \text{ m}$
objemová hmotnost:	$\rho = 550 \text{ kg.m}^{-3}$
zatížení plošné:	$g_{k,m} = \frac{\rho}{100} \cdot t = \frac{550}{100} \cdot 0,08 = 0,44 \text{ kN.m}^{-2}$
zatížení liniové od	zatěžovací šířka: $\bar{s} = 0,250 \text{ m}$
vykonzolované části:	$g'_{k,m} = g_{k,m} \cdot \bar{s} = 0,44 \cdot 0,25 = 0,11 \text{ kN.m}^{-2}$

– zábradlí ze dřeva

Odhad:	$g'_{k,z} = 0,5 \text{ kN.m}^{-1}$
Liniové celkem:	$g'_{k,celk} = g'_{k,m} + g'_{k,z} = 0,61 \text{ kN.m}^{-1}$

### 6.3.2 Zatížení proměnná

#### 6.3.2.1 Zatížení davem chodců (dle [10] )

Plošné svislé:	$q_{k,ch} = 5 \text{ kN.m}^{-1}$
Vodorovná složka (10% ze svislé):	$Q_{flk} = 0,15 = 0,5 \text{ kN.m}^{-1}$
Liniové zatížení od chodců na mostinu:	$q_{k,ch,m} = q_{k,ch} \cdot b = 5,015 = 0,75 \text{ kN.m}^{-1}$

#### 6.3.2.2 Soustředěné zatížení od dopravy

U řešených lávek v korunách stromů je konstrukčně zamezeno vjetí vozidel v důsledku pevné překážky v místě přístupu na lávky a úzké volné šířky. Uvažuje se tedy s osamělou silou  $Q_{fwk} = 2 \text{ kN}$  na roznášecí ploše  $0,1 \times 0,1 \text{ m}$ .

#### 6.3.2.3 Zatížení sněhem

Nadmořská výška vrchu Tanečnice činí 1084 m.n.m. Zatížení sněhem se stanoví z charakteristické hodnoty zatížení  $s_k$ , přičemž charakteristická hodnota zatížení sněhem byla převzata ze sněhové mapy online přístupné z odkazu [75].



Charakteristická hodnota zatížení sněhem:

$$s_k = 5,7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

Liniové zatížení od vykonzolované části:

$$s'_k = s_k \cdot \bar{s} = 5,7 \cdot 0,25 = 1,425 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$$

#### 6.3.2.4 Zatížení větrem

Zatížení větrem bylo spočteno dle ČSN EN 1991-1-4 (Eurokód 1): Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení – Zatížení větrem.

Lávka je navržena pro oblast Beskydy, z toho vyplývá výchozí základní rychlost větru  $v_{b,0}$  podle Mapy větrných oblastí na území ČR → IV. větrná oblast.

Základní rychlost větru:  $v_{b,0} = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Kategorie terénu: II.

Parametr kategorie terénu:  $z_0 = 0,05$

Minimální výška:  $z_{\min} = 2 \text{ m}$

Maximální výška:  $z_{\max} = 200 \text{ m}$

Součinitel směru větru:  $c_{\text{dir}} = 1$  (doporučená hodnota)

Součinitel ročního období:  $c_{\text{season}} = 1$  (doporučená hodnota)

Základní rychlost větru:

$$v_b = c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 30 = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výška lávky nad terénem:

$$h = 20,4 \text{ m}$$

$$z_e = z_i = h = 20,4 \text{ m} \geq z_{\min} = 5 \text{ m}$$

Střední rychlost větru  $v_m(z)$  pro  $z = 20,4 \text{ m}$ :

$c_0(z) = 1$  ... součinitel ortografie

$$k_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left( \frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} = 0,19 \quad \dots \text{ součinitel terénu}$$

$$c_{r(z)} = k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0} = 0,19 \cdot \ln \frac{20,4}{0,05} = 1,14 \quad \dots \text{ součinitel drsnosti terénu}$$

$$v_{m(z)} = c_{r(z)} \cdot c_0(z) \cdot v_b = 1,14 \cdot 1 \cdot 30 = \mathbf{34,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Intenzita turbulence  $I_v(z)$  pro  $z = 20,4$  m:

$k_I = 1$  ...součinitel turbulence (doporučená hodnota)

$$I_{v(z)} = \frac{k_I}{c_{0(z)} \cdot \ln \frac{z}{z_0}} = \frac{1}{1 \cdot \ln \frac{20,4}{0,05}} = \mathbf{0,17}$$

Charakteristický maximální dynamický tlak pro  $z = 20,4$  m:

$\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ...měrná hmotnost vzduchu v oblasti při silné vichřici (doporučená hodnota)

$$q_{p(z)} = [1 + 7 \cdot I_{v(z)}] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{m(z)}^2 = [1 + 7 \cdot 0,17] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 34,26^2 = \mathbf{1588,24 \text{ Pa}}$$

$$\mathbf{q_{p(z)} = 1,588 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}}$$

- **Vítr působící na mostovku ve směru  $z+$  /  $z-$**

Celková šířka mostu:  $b_l = 2,6 \text{ m}$

Součinitelé síly (doporučené dle  $c_{f,z+} = +0,9$

normy [3] dle kapitoly 8):  $c_{f,z-} = -0,9$

Součinitele konstrukce:  $c_s = 1$

$$c_d = 1$$

Výsledná hodnota zatížení větrem  $q_{k+} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,z+} \cdot q_p(z) = 1 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,588 = 1,43 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

na mostovku:  $q_{k-} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,z-} \cdot q_p(z) = 1 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot (-1,588) = -1,43 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Liniové zatížení na horní pásy od  $q'_{k+} = q_{k+} \cdot s = 1,43 \cdot 0,25 = 0,3575 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

vykonzolované části:  $q'_{k-} = q_{k-} \cdot s = -1,43 \cdot 0,25 = -0,3575 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

- **Vítr působící ve směru  $x$  na příhradovou konstrukci**

Vítr ve směru  $x$  byl počítán dle normy [3] - kapitoly 7.11 – Příhradové konstrukce a lešení.

Pro získání hodnot součinitelů síly  $c_{f,0}$  pro prostorovou příhradu samotné lávky byl použit graf z obrázku 7.34 v [3] určený pro prostorovou příhradovou konstrukci s pruty z úhelníků v závislosti na součiniteli plnosti  $\varphi$  a směru působení větru.

Pro získání hodnot součinitelů síly  $c_{f,0}$  pro podpěry byly použity grafy z obrázku 7.35 v [3] určené pro prostorovou příhradovou konstrukci s pruty s kruhovými průřezy v závislosti na Reynoldsovém čísle a směru působení větru.

### Vítr na prostorovou příhradu z úhelníků

Plocha ohraničená okraji čelní plochy (odečtena programem Archicad 17 viz. obr. č. 69):

$$\text{Pole č. 1} - A_c = 61,19 \text{ m}^2$$

$$\text{Pole č. 2} - A_c = 31,9 \text{ m}^2$$

$$\text{Pole č. 3} - A_c = 61,28 \text{ m}^2$$

**Referenční plocha  $A_{ref}$**  (odečtena programem Archicad 17 viz. obr. č. 69):

$$A_{ref} = A$$

$$A = \sum b_i l_i$$

Kde  $b_i l_i$  .... šířka a délka i-tého prutu, promítnutá kolmo k čelní ploše

$$\text{Pole č. 1} - A = 26,93 \text{ m}^2$$

$$\text{Pole č. 2} - A = 23,99 \text{ m}^2$$

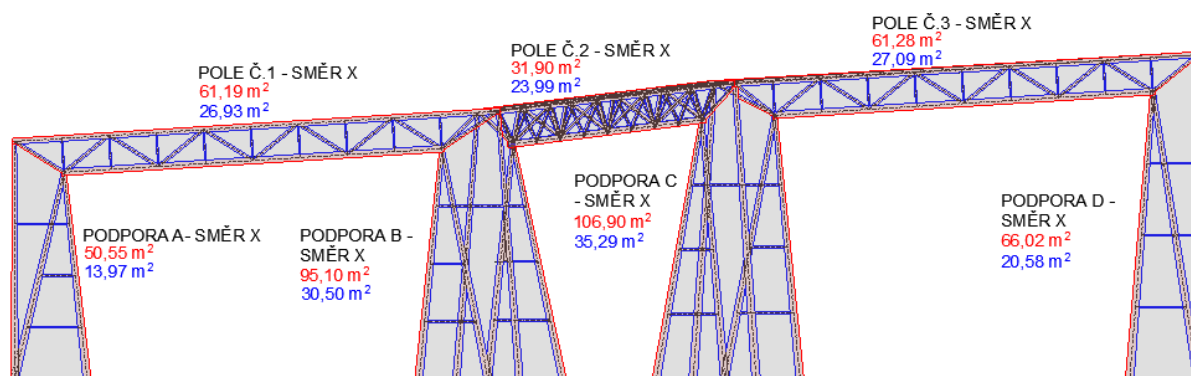
$$\text{Pole č. 3} - A = 27,09 \text{ m}^2$$

Součinitelé plnosti  $\varphi$ :

$$\text{Pole č. 1:} \quad \varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{26,93}{61,19} = 0,44$$

$$\text{Pole č. 2:} \quad \varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{23,99}{31,9} = 0,75$$

$$\text{Pole č. 3:} \quad \varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{27,09}{61,28} = 0,44$$



Obr. č. 69: Plochy ohraničené okraji čelní plochy a referenční plochy pro vítr ve směru x

Součinitelé síly  $c_{f,0}$ :

$$\text{Pole č. 1:} \quad c_{f,0} = 1,16$$

Pole č. 2:  $c_{f,0} = 0,8$

Pole č. 3:  $c_{f,0} = 1,16$

Výsledná hodnota zatížení větrem:

Pole č. 1:  $w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,16.1,588 = 1,84 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Pole č. 2:  $w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.0,8.1,588 = 1,27 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Pole č. 3:  $w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,16.1,588 = 1,84 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Roznos zatížení na jednotlivé pruty:

Pole č. 1 a pole č. 3:

Prvek	Šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
Horní pás	$b = 0,35 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,84 \cdot 0,35 = 0,645 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Dolní pás	$b = 0,40 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,84 \cdot 0,40 = 0,737 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Diagonála	$b = 0,20 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,84 \cdot 0,20 = 0,368 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Svislice	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,84 \cdot 0,12 = 0,221 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

Pole č. 2:

Prvek	Šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
Horní pás	$b = 0,35 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,27 \cdot 0,35 = 0,445 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Dolní pás	$b = 0,40 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,27 \cdot 0,40 = 0,508 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Diagonála	$b = 0,20 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,27 \cdot 0,20 = 0,254 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Svislice	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,27 \cdot 0,12 = 0,152 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

Vítr na prostorovou příhradu s kruhovými průřezy

Plocha ohraničená okraji čelní plochy (odečtena programem Archicad 17 viz. obr. č. 69):

Podpora A –  $A_c = 50,55 \text{ m}^2$

Podpora B –  $A_c = 95,10 \text{ m}^2$

Podpora C –  $A_c = 106,90 \text{ m}^2$

Podpora D –  $A_c = 66,02 \text{ m}^2$

**Referenční plocha  $A_{ref}$**  (odečtena programem Archicad 17 viz. obr. č. 69):

$$A_{ref} = A$$

$$A = \sum b_i l_i$$

Kde  $b_i l_i$  .... šířka a délka i-tého prutu, promítnutá kolmo k čelní ploše

$$\text{Podpora A} - A = 13,97 \text{ m}^2$$

$$\text{Podpora B} - A = 30,50 \text{ m}^2$$

$$\text{Podpora C} - A = 35,29 \text{ m}^2$$

$$\text{Podpora D} - A = 20,58 \text{ m}^2$$

**Součinitelé plnosti  $\varphi$ :**

$$\text{Podpora A: } \varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{13,97}{50,55} = 0,28$$

$$\text{Podpora B: } \varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{30,50}{95,10} = 0,32$$

$$\text{Podpora C: } \varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{35,29}{106,90} = 0,33$$

$$\text{Podpora D: } \varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{20,58}{66,02} = 0,31$$

**Reynoldsovo číslo:**

Maximální průměr sloupu:

$$b = 0,5 \text{ m}$$

Kinematická viskozita vzduchu:

$$\nu = 0,000015 \text{ m}^2/\text{s}$$

Měrná hmotnost vzduchu:

$$\rho = 1,25 \text{ kg.m}^{-3}$$

Rychlost větru:

$$v(z_e) = \sqrt{2 \cdot q_p(z_e) / \rho} = \sqrt{2 \cdot 1,588 / 1,25} = 1,59$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} = \frac{0,5 \cdot 1,59}{0,000015} = 5,31 \cdot 10^4$$

**Součinitelé síly  $c_{f,0}$ :**

Podpora A:	Pro „trojnožku“ + ztužení	$c_{f,0} = 1,28$	Pro „roznožku“	$c_{f,0} = 0,7$
Podpora B:	Vše	$c_{f,0} = 1,28$	–	–
Podpora C:	Vše	$c_{f,0} = 1,28$	–	–
Podpora D:	Pro „trojnožku“ + ztužení	$c_{f,0} = 1,28$	„Pro roznožku“	$c_{f,0} = 0,6$

Výsledná hodnota zatížení větrem:

Podpora A+D „trojnožka“ + ztužení	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,28.1,588 = 2,03 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora A „roznožka“	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.0,7.1,588 = 1,11 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora D „roznožka“	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.0,6.1,588 = 0,95 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora B+C vše	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,28.1,588 = 2,03 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Roznos zatížení na jednotlivé pruty:

PODPORA B+C

Prvek	Průměrná šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
„Roznožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,395 = 0,803 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
„Trojnožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,395 = 0,803 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
ztužení	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,12 = 0,244 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

PODPORA A

Prvek	Šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
„Roznožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,11.0,395 = 0,439 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
„Trojnožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,395 = 0,803 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
ztužení	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,12 = 0,244 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

PODPORA D

Prvek	Šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
„Roznožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 0,95.0,395 = 0,362 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
„Trojnožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,395 = 0,803 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
ztužení	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,12 = 0,244 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

• **Vítr působící ve směru y na příhradovou konstrukci**

Vítr ve směru y byl počítán dle normy [3] - kapitoly 7.11 – Příhradové konstrukce a lešení.

**Vítr na prostorovou příhradu z úhelníků**

Plocha ohraničená okraji čelní plochy (odečtena programem Archicad 17 viz. obr.č. 70):

$$\text{Pole č. 2} - A_c = 55,86 \text{ m}^2$$

**Referenční plocha  $A_{ref}$**  (odečtena programem Archicad 17 viz. obr.č. 70):

$$A_{ref} = A$$

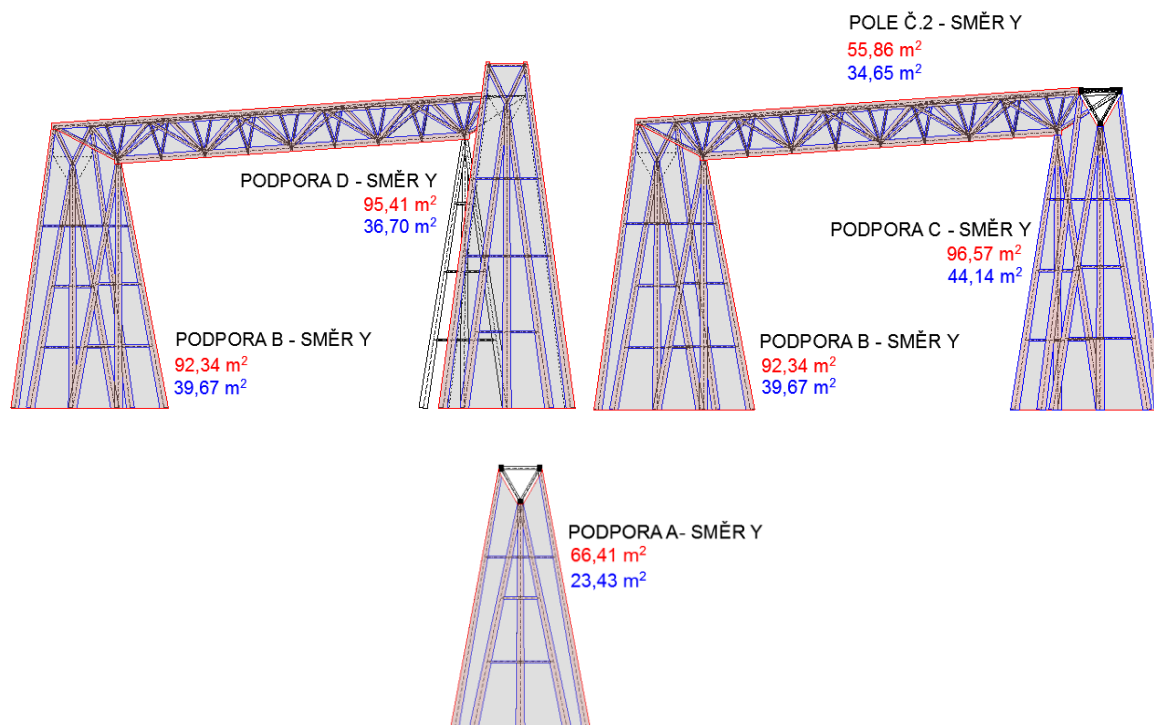
$$A = \sum b_i l_i$$

Kde  $b_i l_i$  .... šířka a délka i-tého prutu, promítnutá kolmo k čelní ploše

$$\text{Pole č. 2} - A = 34,65 \text{ m}^2$$

Součinitelé plnosti  $\varphi$ :

$$\text{Pole č. 2: } \varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{34,65}{55,86} = 0,62$$



Obr. č. 70: Plochy ohraničené okraji čelní plochy a referenční plochy pro vítr ve směru y

Součinitelé síly  $c_{f,0}$ :

Pole č. 2:  $c_{f,0} = 0,8$

Výsledná hodnota zatížení větrem:

Pole č. 2:  $w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.0,8.1,588 = 1,27 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Roznos zatížení na jednotlivé pruty:

Pole č. 2:

Prvek	Šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
Horní pás	$b = 0,35 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,27 \cdot 0,35 = 0,445 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Dolní pás	$b = 0,40 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,27 \cdot 0,40 = 0,508 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Diagonála	$b = 0,20 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,27 \cdot 0,20 = 0,254 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Svislice	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,27 \cdot 0,12 = 0,152 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

### Vítr na prostorovou příhradu s kruhovými průřezy

Plocha ohraničená okraji čelní plochy (odečtena programem Archicad 17 viz. obr.č. 70):

Podpora A –  $A_c = 66,41 \text{ m}^2$

Podpora B –  $A_c = 92,34 \text{ m}^2$

Podpora C –  $A_c = 96,57 \text{ m}^2$

Podpora D –  $A_c = 95,41 \text{ m}^2$

Referenční plocha  $A_{ref}$  (odečtena programem Archicad 17 viz. obr.č. 70):

$A_{ref} = A$

$$A = \sum b_i l_i$$

Kde  $b_i l_i$  .... šířka a délka i-tého prutu, promítnutá kolmo k čelní ploše

Podpora A –  $A = 23,43 \text{ m}^2$

Podpora B –  $A = 39,67 \text{ m}^2$

Podpora C –  $A = 44,14 \text{ m}^2$

Podpora D –  $A = 36,70 \text{ m}^2$



### Součinitelé plnosti $\varphi$ :

Podpora A:  $\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{23,43}{66,41} = 0,35$

Podpora B:  $\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{39,67}{92,34} = 0,43$

Podpora C:  $\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{44,14}{96,57} = 0,46$

Podpora D:  $\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{36,7}{95,41} = 0,39$

### Reynoldsovo číslo:

Maximální průměr sloupu:

$$b = 0,5 \text{ m}$$

Kinematická viskozita vzduchu:

$$\nu = 0,000015 \text{ m}^2/\text{s}$$

Měrná hmotnost vzduchu:

$$\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Rychlost větru:

$$v(z_e) = \sqrt{2 \cdot q_p(z_e) / \rho} = \sqrt{2 \cdot 1,588 / 1,25} = 1,59$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} = \frac{0,5 \cdot 1,59}{0,000015} = 5,31 \cdot 10^4$$

### Součinitelé síly $c_{f,0}$ :

Podpora A: Pro „trojnožku“ + ztužení  $c_{f,0} = 1,28$  Pro „roznožku“  $c_{f,0} = 1,1$

Podpora B: Pro „trojnožku“ + ztužení  $c_{f,0} = 1,45$  Pro „roznožku“  $c_{f,0} = 1,1$

Podpora C: Pro „trojnožku“ + ztužení  $c_{f,0} = 1,28$  Pro „roznožku“  $c_{f,0} = 1,1$

Podpora D: Pro „trojnožku“ + ztužení  $c_{f,0} = 1,45$  Pro „roznožku“  $c_{f,0} = 1,1$

Výsledná hodnota zatížení větrem:

Podpora A+C „trojnožka“ + ztužení	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,28.1,588 = 2,03 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora C „roznožka“	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,28.1,588 = 2,03 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora A „roznožka“ + ztužení 90°	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,1.1,588 = 1,75 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora C ztužení 90°	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,1.1,588 = 1,75 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora B „trojnožka“ + ztužení	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.0,6.1,588 = 2,30 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora B „roznožka“ + ztužení 90° + diagonála	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,28.1,588 = 1,75 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora D „trojnožka“ + ztužení + diagonála + + příčník	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.0,6.1,588 = 2,30 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$
Podpora D „roznožka“ + ztužení 90°	$w_{k,x} = c_s \cdot c_d \cdot c_{f,0} \cdot q_p(z) = 1.1.1,28.1,588 = 1,75 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Roznos zatížení na jednotlivé pruty:

PODPORA A

Prvek	Průměrná šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
„Roznožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,75.0,395 = 0,690 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
„Trojnožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,395 = 0,803 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Ztužení 90°	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,75.0,12 = 0,210 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Ztužení	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03.0,12 = 0,244 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

Prvek	Šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
„Roznožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,75 \cdot 0,395 = 0,690 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
„Trojnožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,30 \cdot 0,395 = 0,910 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Ztužení	$b = 0,120 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,30 \cdot 0,120 = 0,276 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Diagonála	$b = 0,200 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,75 \cdot 0,200 = 0,349 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

PODPORA C

Prvek	Šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
„Roznožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03 \cdot 0,395 = 0,803 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
„Trojnožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03 \cdot 0,395 = 0,803 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Ztužení	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,03 \cdot 0,12 = 0,244 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Ztužení 90°	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,75 \cdot 0,12 = 0,210 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

PODPORA D

Prvek	Šířka	Výsledná hodnota zatížení větrem na nosník
„Roznožka“	$b = 0,380 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,75 \cdot 0,380 = 0,664 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
„Trojnožka“	$b = 0,395 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,30 \cdot 0,395 = 0,910 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Ztužení	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,30 \cdot 0,12 = 0,276 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Ztužení 90°	$b = 0,12 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 1,75 \cdot 0,12 = 0,210 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Diagonála	$b = 0,20 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,30 \cdot 0,20 = 0,461 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
Příčník	$b = 0,18 \text{ m}$	$w_{k,x,HP} = w_{k,x} \cdot b = 2,30 \cdot 0,18 = 0,415 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$

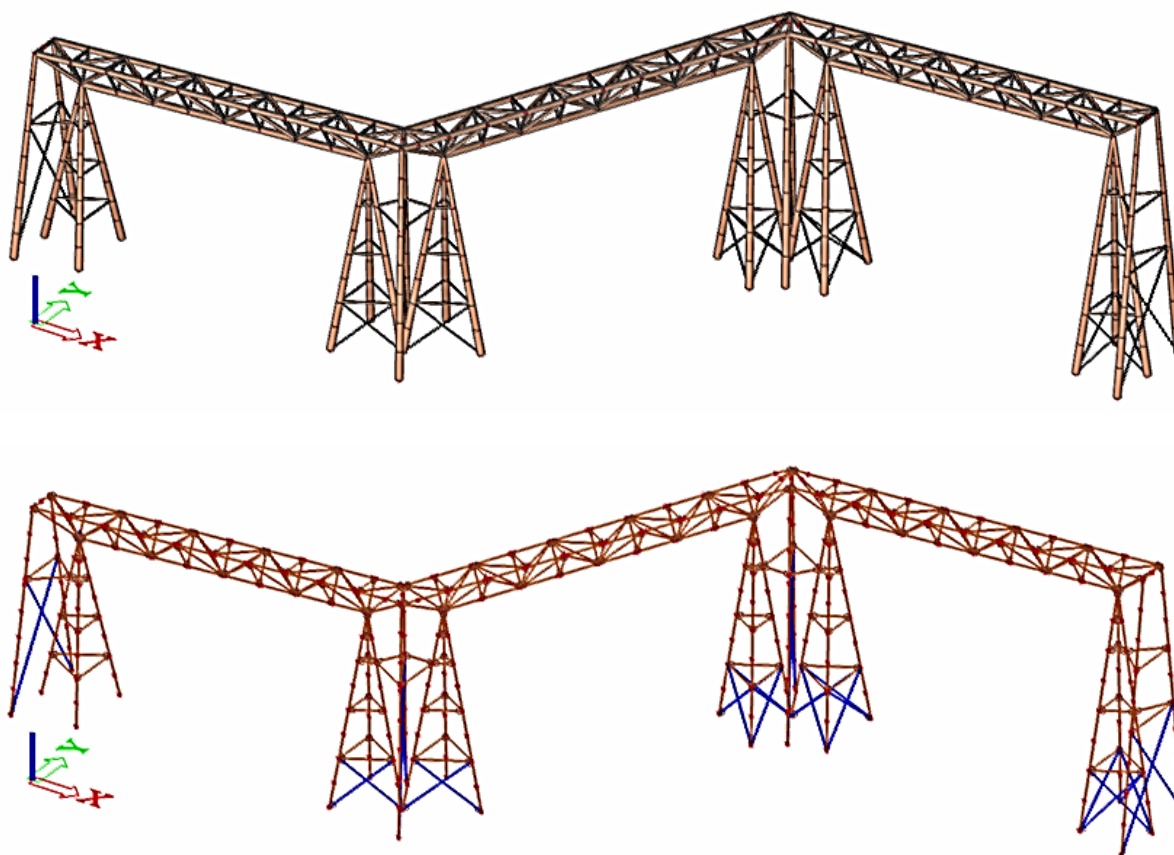
## 6.4 Numerický model

Konstrukce byla vymodelována v Programu Scia Engineer14. Byly zadány jednotlivé zatěžovací stavy a kombinace odpovídající normovým požadavkům [(STR/GEO) (Soubor B)]. Kombinace byly zadány pomocí funkcionality „Návrh mostů → Kombinace zatížení“. Následně byly zatěžovací stavy zařazeny do skupin zatížení, což umožnilo korektní vytvoření kombinací.

Na ocelových táhlech byly zadány nelinearity v podobě vyloučení tlaku. V modelu jsou aplikovány kloubové přípoje a podpory. Výpočet byl proveden jako nelineární, přičemž nelineární kombinace byly vytvořeny z rozložených lineárních kombinací.

Nelineárním výpočtem byly získány hodnoty vnitřních sil a okamžité průhyby, na které byly dimenzované prvky a spoje.

Numerický model je zobrazen na obr. č. 71.



Obr. č. 71: Numerický model řešené konstrukce

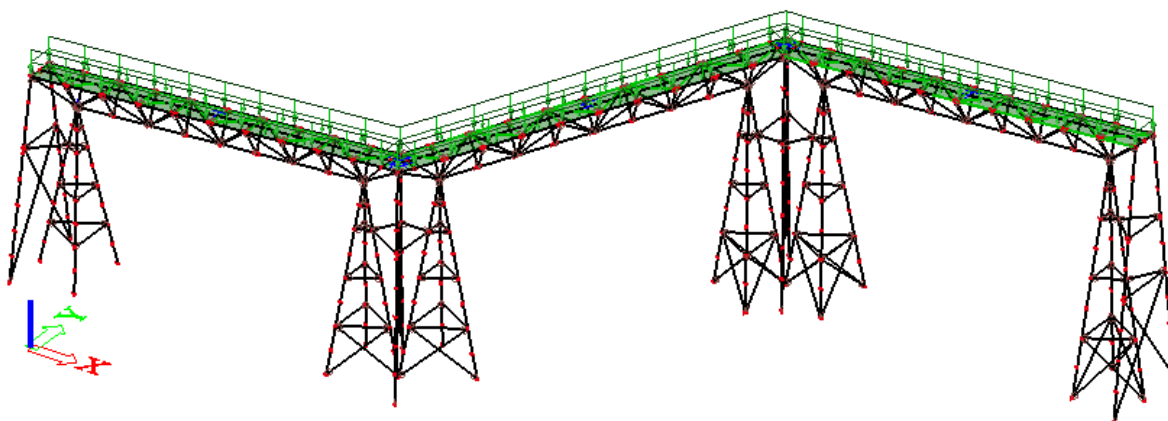
## 6.5 Zatěžovací stavy a kombinace zatížení

Bylo vytvořeno celkem deset zatěžovacích stavů, ze kterých pak byly vytvořeny nelineární kombinace dle kombinačních pravidel uvedených v ČSNE EN 1990 a ČSN EN 1990/A1. Doporučené hodnoty součinitelů  $\psi$  pro lávky pro chodce jsou uvedeny v tabulce A2.2 v [9]. Kombinační vzorce pro mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti jsou uvedeny v odst. 5.4.1 a 5.4.2. Programem bylo vygenerováno celkem 79 kombinací pro mezní stav únosnosti a 39 kombinací pro mezní stav použitelnosti.

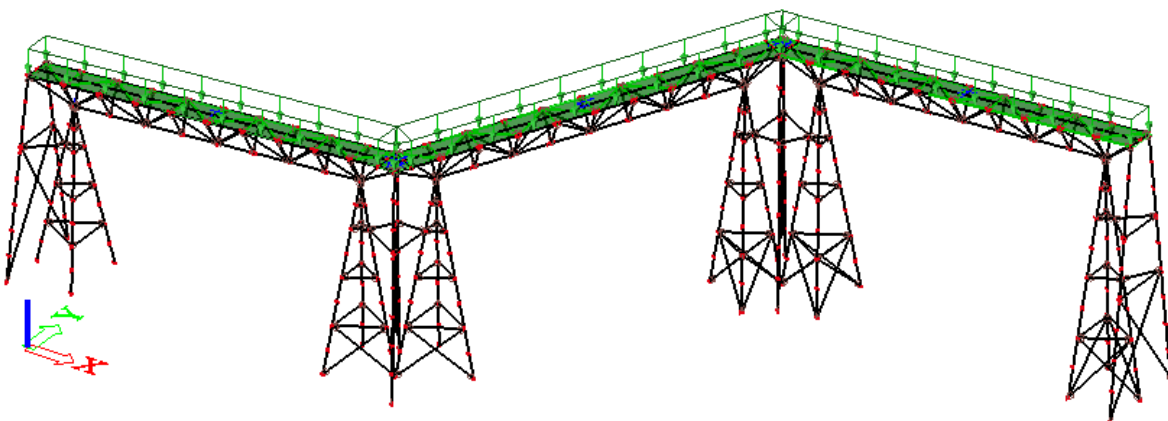
### Zatěžovací stavy

**ZS1 – vlastní tíha**

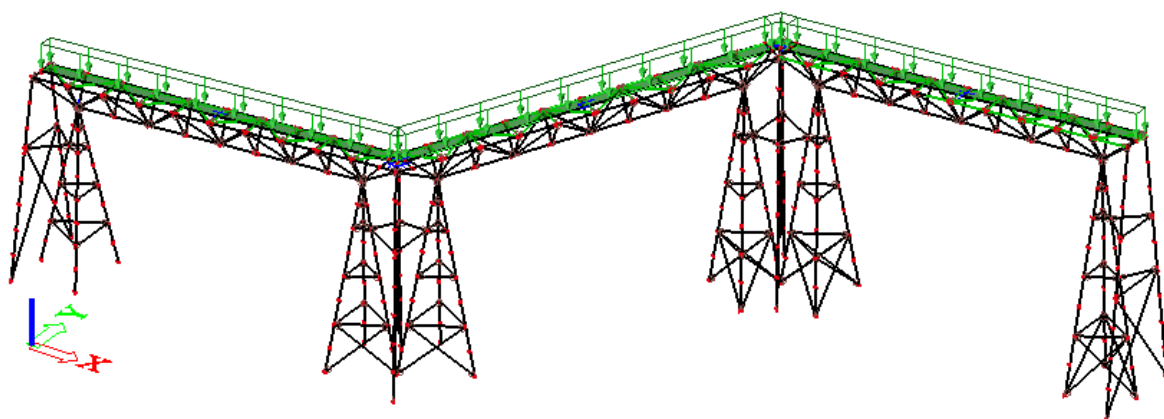
**ZS2 – stálé**



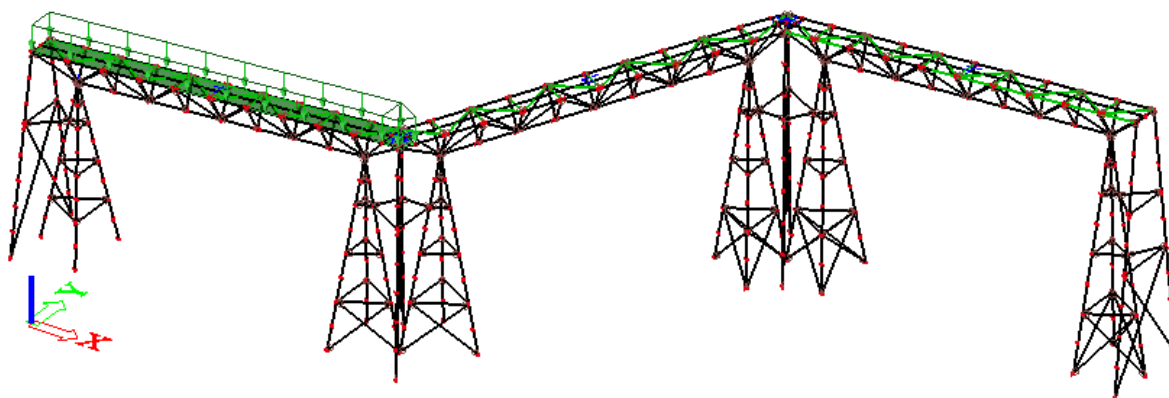
**ZS3 – chodci**



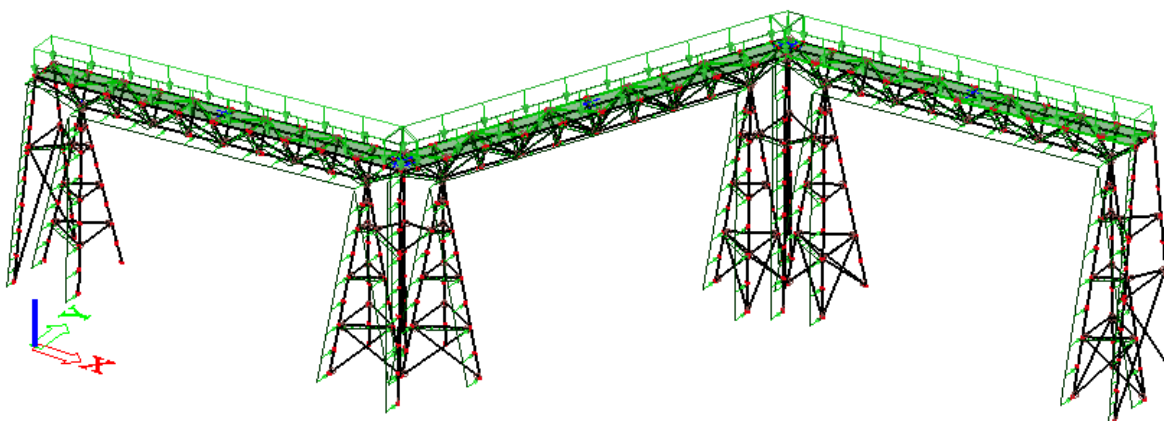
**ZS4 – chodci na polovině mostovky**



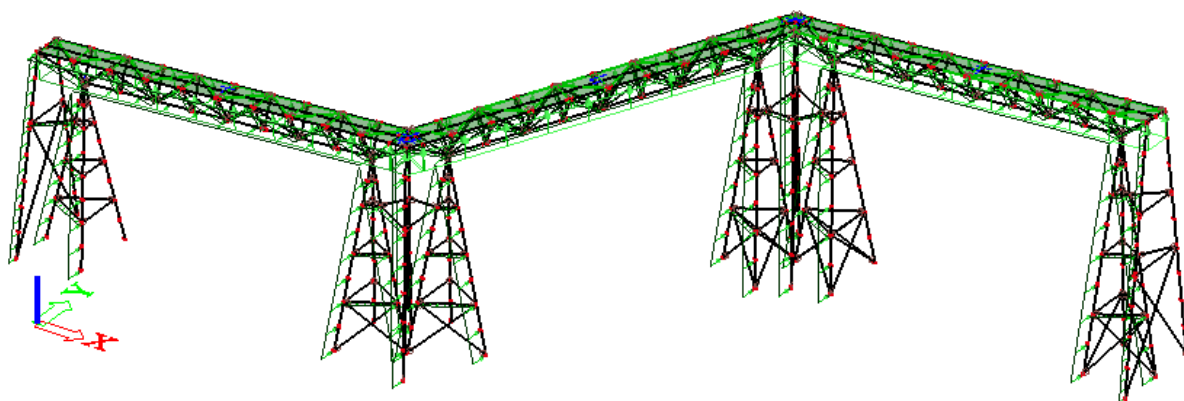
**ZS5 – chodci na 1/3 délky**



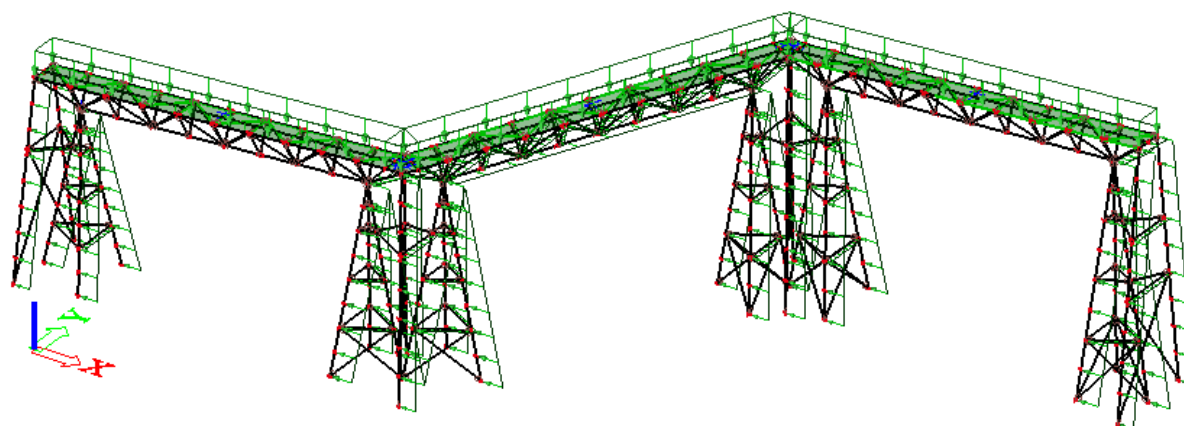
**ZS6 – vítr směr x/ směr z-**



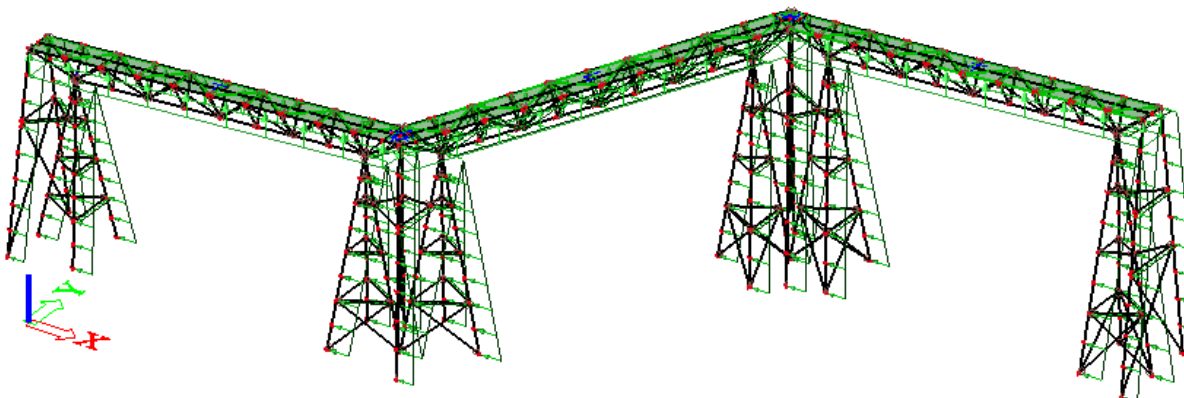
ZS7 – vítr směr x/ směr z+

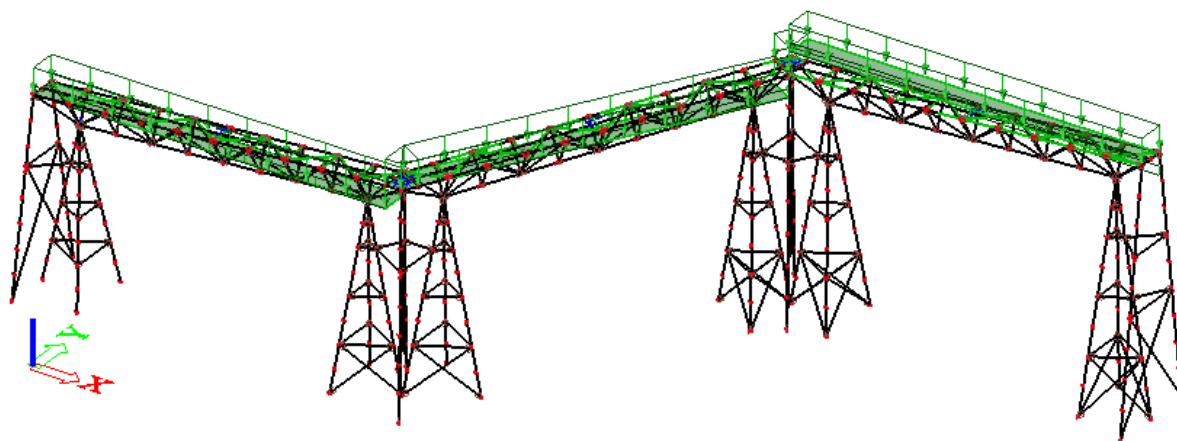


ZS8 – vítr směr y/ směr z-



ZS9 – vítr směr y/ směr z+





## 6.6 Návrh a posudek prvků

Všechny dřevěné nosné prvky byly posouzeny v souladu s podmínkami uvedenými v platných normách [5], [6] a [7]. Ocelové prvky byly posouzeny v souladu s normou [11].

### 6.6.1 Mostiny

Mostiny jsou obdélníkového průřezu o velikosti 80x150 mm z řeziva třídy D40. Mostina byla navržena jako nosník o rozpětí 2,1 m s převislými konci o velikosti 0,25 m. Každá mostina bude připevněna na svých koncích pomocí vrutů 2 x Ø5 mm do horních pásů příhradoviny. Na horních pásech a diagonálách v úrovni mostovky bude aplikována hydroizolační vrstva. Mostina byla vymodelována v programu Scia Engineer a následně byly získány hodnoty vnitřních sil a deformací. U lávek, u kterých je konstrukčně zamezeno vjetí vozidel (např. pevná překážka v místě přístupu na lávku, lávka je úzká) se uvažuje s osamělou silou  $Q_{fwk}=2$  kN na roznášecí ploše 0,1 x 0,1 m, což je i případ řešené konstrukce. Dalšími zatěžovacími stavy jsou spojitá zatížení způsobené davem chodců působící na celém rozpětí a na levé či pravé polovině rozpětí. Pro vyvolání maximálního smykového účinku bylo osamělé břemeno umístěno u podpory. Pro vyvolání maximálního ohybového momentu bylo osamělé břemeno umístěno uprostřed rozpětí.

Návrh: *obdélníkový průřez 80x150 z řeziva třídy D40*

Rozpětí:  $l = 2,1$  m



Roznášecí šířka:  $\check{s} = 0,150 \text{ m}$

Zatížení chodci:  $q_{k,ch} = 5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Linové zatížení chodci:  $q'_{k,ch} = \check{s} \cdot q_{k,ch} = 0,150 \cdot 5 = 0,75 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Soustředěné zatížení:  $F_{k,q} = 2 \text{ kN}$

Součinitel spolehlivosti:  $\gamma_{q,g} = 1,35$

#### Materiálové charakteristiky:

Pevnost v ohybu:  $f_{m,k} = 40 \text{ MPa}$

Pevnost ve smyku:  $f_{v,k} = 4 \text{ MPa}$

Hustota:  $\rho = 550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Modifikační součinitel:  $k_{mod} = 0,7$  (Třída provozu 3, krátkodobé zatížení)

#### Návrhové hodnoty pevností:

Pevnost v ohybu:  $f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,7 \frac{40}{1,3} = 21,45 \text{ MPa}$

Pevnost ve smyku:  $f_{v,d} = k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,7 \frac{4}{1,3} = 2,15 \text{ MPa}$

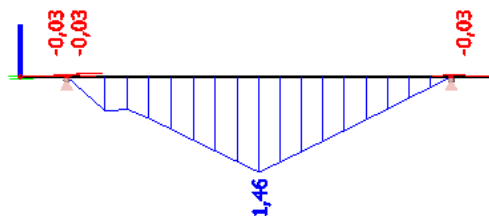
#### Průřezové charakteristiky:

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67 \text{ (RD)}$   
 $b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 150 = 100,5 \text{ mm}$   
 $A_{ef} = h \cdot b_{ef} = 80 \cdot 100,5 = 8040 \text{ mm}^2$

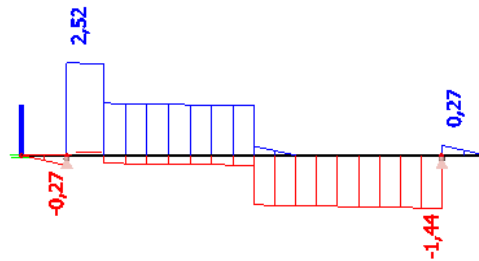
Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b \cdot h^2 = \frac{1}{6} 150 \cdot 80^2 = 1,6 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$

#### Vnitřní síly:

Ohybový moment:  $M_{Ed,y} = 1,46 \text{ kNm}$



$$V_{Ed} = 2,79 \text{ kN}$$



#### Návrhové napětí:

Návrhové napětí v ohybu k hlavní ose y:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,y}}{W_y \cdot 10^{-6}} = \frac{1,46}{1,6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 9,13 \text{ MPa}$$

Návrhové napětí ve smyku:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{2,79}{8040 \cdot 10^{-3}} = 0,52 \text{ MPa}$$

#### Posouzení MSÚ:

##### **Ohyb:**

$$\sigma_{m,y,d} \leq f_{m,y,d}$$

$$9,13 \text{ MPa} \leq 21,45 \text{ MPa}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

##### **Smyk:**

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$0,52 \text{ MPa} \leq 2,15 \text{ MPa}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Okamžitý průhyb:

Chodci:

$$w_{inst,Q} = 2,2 \text{ mm}$$

Osamělé břemeno:

$$w_{inst,Q} = 4,8 \text{ mm}$$

#### Posouzení MSP:

$$w_{inst,Q} \leq w_{inst,lim} = \frac{L}{400}$$

$$4,8 \text{ mm} \leq w_{inst,lim} = \frac{2100}{400} = 5,25 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

## **6.6.2 Zábradlí**

Je navrženo z průřezů třídy C24. Tvoří jej vodorovné prvky a svislé sloupky. Zábradlí bylo vymodelováno ve Scia Engineer. Vodorovné prvky velikosti průřezu 120 x 100 mm působí jako prostá pole o rozpětí 1395 mm a jsou kotveny ke sloupkům o rozměrech

120x120 mm, jež vodorovné nosníky podpírají. Výplň zábradlí tvoří nerezová síťovina. Dle normy [10] odstavec 4.8 Zatížení na zábradlí poznámka č. 2 říká, že doporučená minimální hodnota proměnného zatížení na zábradlí pro chodníky i lávky pro chodce ve směru svislém nebo vodorovném je 1,0 kN/m. Na svislici byla zadána také vodorovná osamělá síla o velikosti 0,5 kN simulující sílu od případného kopnutí.

### 6.6.2.1 Vodorovné prvky

Návrh: C24 120 x 100 mm

b = 120 mm

h = 100 mm

Rozpětí: L = 1 395 mm

Zatížení:

Bylo uvažováno se spojitým zatížením ve vodorovné nebo svislé rovině dle normy [10] odstavec 4.8 viz výše. Vlastní tíha byla generována programem Scia Engineer.

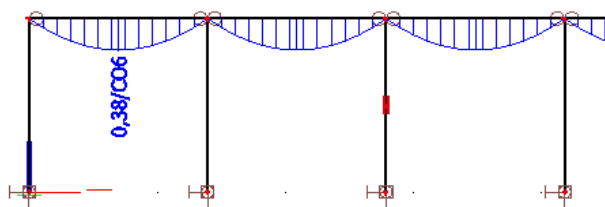
$$q_k = 1 \text{ kNm}$$

$$q_d = \gamma_Q \cdot q_k = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ kN/m}$$

**MSÚ – Ohyb**

Vnitřní síly:

Ohybový moment:  $M_{Ed,max} = 0,38 \text{ kNm}$



Maximální návrhový ohybový moment:

$$M_{Ed,max} = 0,38 \text{ kNm}$$

Průřezový modul k ose y

$$W_y = \frac{1}{6}bh^2 = \frac{1}{6}120 \cdot 100^2 = 2,88 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Návrhové napětí:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{Ed,max}}{W_y \cdot 10^{-6}} = \frac{0,38}{2,88 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 1,90 \text{ MPa}$$

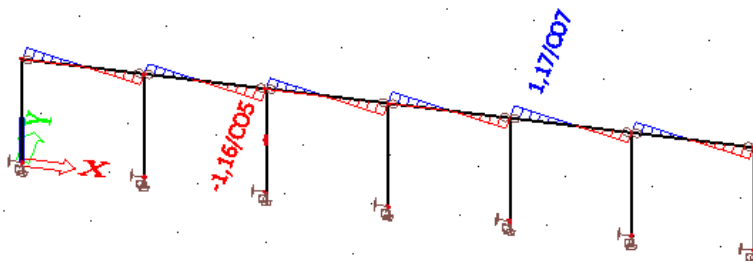
Posouzení:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = \frac{1,90}{12,92} = 0,15 \leq 1$$

## Smyk

### Vnitřní síly:

Ohybový moment:  $V_{Ed,max} = 1,17 \text{ kNm}$



Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (RD)}$$

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 120 = 80,4 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = h \cdot b_{ef} = 100 \cdot 80,4 = 8040 \text{ mm}^2$$

Návrhové napětí ve smyku:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1,17}{8040 \cdot 10^{-3}} = 0,22 \text{ MPa}$$

**Posouzení:**

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$0,22 \text{ MPa} \leq 2,15 \text{ MPa}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

## MSÚ – Průhyb

Nejnepříznivější kombinace je CO28 (vlastní tíha + spojitě svislé)

### Okamžitý průhyb:

Vlastní tíha:

$$w_{inst,Q} = 0,0 \text{ mm}$$

Spojitě svislé:

$$w_{inst,Q} = 0,5 \text{ mm}$$

### Konečný průhyb:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) = 0(1 + 2) = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) = 0,5(1 + 0,2) = 0,5 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} = 0 + 0,5 = 0,5 \text{ mm}$$

### Posouzení MSP:

$$w_{inst,celk} \leq w_{inst,lim} = \frac{L}{300}$$

$$w_{inst,celk} = 0,5 \text{ mm} \leq w_{inst,lim} = \frac{1395}{300} = 4,65 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.2.2 Svislé prvky

Návrh: C24 120 x 120 mm

b = 120 mm

h = 120 mm

Rozpětí: L = 1 375 mm

Zatížení:

Svislé prvky přebírají účinky od vodorovných prvků. Bylo uvažováno také se silou o velikosti 0,5 kN simulující případné kopnutí do sloupku. Vlastní tíha byla generována programem Scia Engineer.

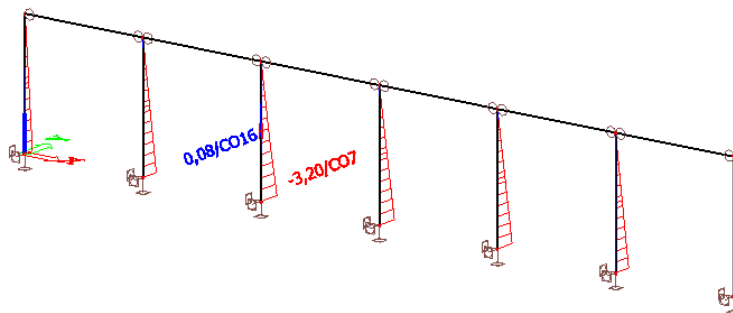
$$Q_k = 0,5 \text{ kN}$$

$$Q_d = \gamma_Q \cdot q_k = 1,5 \cdot 0,5 = 0,75 \text{ kN}$$

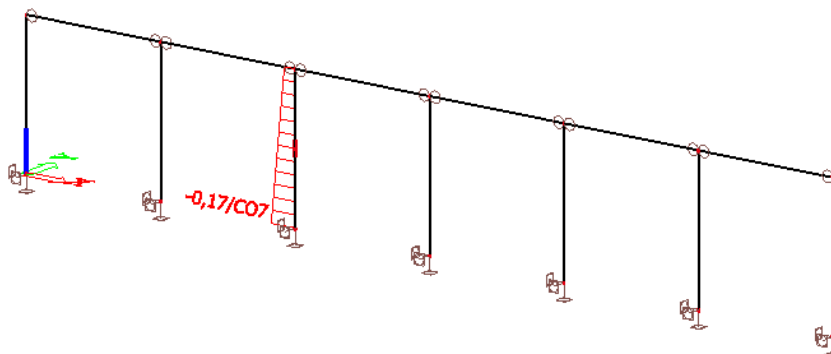
**MSÚ – Ohyb**

Vnitřní síly:

Ohybový moment:  $M_{Ed,max} = 0,38 \text{ kNm}$



Příslušná normálová síla:  $N_{Ed,přisl} = 0,17 \text{ kNm}$



- Průřezové charakteristiky:

Plocha:  $A = b \cdot h = 120 \cdot 120 = 14400 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 2,88 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$

Moment setrvačnosti:  $I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 1,73 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

Poloměr setrvačnosti:  $i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 34,64 \text{ mm}$

**MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:**

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,prisl} = 0,17 \text{ kN}$  CO7

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,max} = 3,20 \text{ kNm}$  CO7

*Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):*

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{0,17}{14400 \cdot 10^{-3}} = 0,01 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{3,20}{2,88 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 11,11 \text{ MPa}$

*Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:*

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 1375 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{1375}{34,64} = 36,69$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{36,69}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,673$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,673 - 0,3) + 0,673^2)$

$$k_z = 0,764$$

Součinitel  $k_{cz}$ :

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,764 + \sqrt{0,764^2 - 0,673^2}} = 0,889$$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37 ) :

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,01}{0,889 \cdot 11,31} + 0,7 \frac{0}{12,92} + \frac{11,11}{12,92} \leq 1$$

$$0,0012 + 0,00 + 0,8598 \leq 1$$

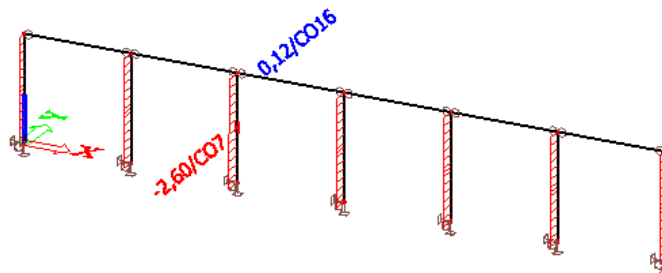
$$0,861 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

**Smyk:**

Vnitřní síly:

Návrhová smyková síla:  $V_{Ed,max} = 2,6 \text{ kNm}$



Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :

$$k_{cr} = 0,67 \text{ (RD)}$$

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 120 = 80,4 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = h \cdot b_{ef} = 120 \cdot 80,4 = 9648 \text{ mm}^2$$

Návrhové napětí ve smyku:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{2,6}{9648 \cdot 10^{-3}} = 0,40 \text{ MPa}$$

**Posouzení:**

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$0,40 \text{ MPa} \leq 2,15 \text{ MPa}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

## MSÚ – Průhyb

Nejnepříznivější kombinace je CO29. (vlastní tíhá + spojitě vodorovné + osamělá síla.0,7)

### Okamžitý průhyb:

Vlastní tíha:

$$w_{inst,Q} = 0,0 \text{ mm}$$

Spojitě vodorovné:

$$w_{inst,Q1} = 6,8 \text{ mm}$$

Osamělá síla:

$$w_{inst,Q2} = 0,4 \text{ mm}$$

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q1} + w_{inst,Q2} = 0 + 6,8 + 0,4 \cdot 0,7 = 7,08 \text{ mm}$$

### Konečný průhyb:

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0(1 + 2) = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q1} = w_{inst,Q1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 6,8(1 + 0,2) = 6,8 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q2} = w_{inst,Q2}(\psi_0 + \psi_{2,1}k_{def}) = 0,4(0,7 + 0,2) = 0,28 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q1} = 0 + 6,8 + 0,28 = 7,08 \text{ mm}$$

### Posouzení MSP: (limitní průhyby pro vykonzolovaný nosník

$$w_{inst,celk} \leq w_{inst,lim} = \frac{L}{150}$$

$$w_{inst,celk} = 7,08 \text{ mm} \leq w_{inst,lim} = \frac{1395}{150} = 9,17 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

## 6.6.3 Horní pásy

Horní pásy jsou navrženy obdélníkového průřezu o rozměrech 200x350mm z rostlého dřeva třídy C24. Kritickým posudkem je vzpěrný tlak v kombinaci s ohybem. Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno že  $\lambda_{rel,m} = 0,34$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

### - Průřezové charakteristiky:

Plocha:  $A = b \cdot h = 200 \cdot 350 = 70000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6}bh^2 = 4,08 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6}hb^2 = 2,33 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12}bh^3 = 7,15 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$



$$I_z = \frac{1}{12}hb^3 = 2,33 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 101,04 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 57,74 \text{ mm}$$

### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximálního ohybu  $M_y$  s příslušnou tahovou silou a příslušným ohybovým momentem  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,max} = 18,49 \text{ kN}$  NC79

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 116,68 \text{ kN}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 0,94 \text{ kNm}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{116,68}{70000 \cdot 10^{-3}} = 1,67 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{18,49}{4,08 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 3,46 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,94}{2,33 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,48 \text{ MPa}$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,67}{7,54} + \frac{3,46}{12,92} + 0,7 \frac{0,48}{12,92} \leq 1$$

$$0,29 + 0,27 + 0,03 \leq 1$$

$$0,59 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

Vnitřní síly:

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 292 \text{ kN}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přisl} = 7,11 \text{ kNm}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přisl} = 2,02 \text{ kNm}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{292}{70000 \cdot 10^{-3}} = 4,17 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{7,11}{4,08 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,74 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{2,02}{2,33 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,87 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,y} = 2790 \text{ mm}$

$L_{cr,z} = 2790 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2790}{101,04} = 27,61$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2790}{57,74} = 48,32$$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{27,61}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,468$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{48,32}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,819$$

Součinitel  $k_y$ :  $k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,468 - 0,3) + 0,468^2)$

$$k_y = 0,626$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,819 - 0,3) + 0,819^2)$

$$k_z = 1,888$$

Součinitel  $k_{cy}$ :

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,626 + \sqrt{0,626^2 - 0,468^2}} = 0,959$$

Součinitel  $k_{cz}$ :

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,888 + \sqrt{1,888^2 - 0,819^2}} = 0,814$$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37) :

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{4,17}{0,814 \cdot 11,31} + 0,7 \frac{1,74}{12,92} + \frac{0,87}{12,92} \leq 1$$

$$0,38 + 0,13 + 0,05 \leq 1$$

$$0,57 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.36) :

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{4,17}{0,959 \cdot 11,31} + \frac{1,74}{12,92} + 0,7 \frac{0,87}{12,92} \leq 1$$

$$0,45 + 0,09 + 0,07 \leq 1$$

$$0,61 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### **MSÚ – Smyk:**

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67$  (RD)

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 200 = 134 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = h \cdot b_{ef} = 350 \cdot 134 = 46900 \text{ mm}^2$$

Vnitřní síly:

Smykové síly:  $V_{Ed,z,max} = 20,93 \text{ kN}$  NC79

$V_{Ed,y,přísl} = 0,58 \text{ kN}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :

$$\text{Návrhová napětí ve smyku: } \tau_{d,z} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed,z,max}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{20,93}{46900 \cdot 10^{-3}} = 0,02 \text{ MPa}$$

$$\tau_{d,y} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed,y}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{0,58}{46900 \cdot 10^{-3}} = 0,67 \text{ MPa}$$

Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

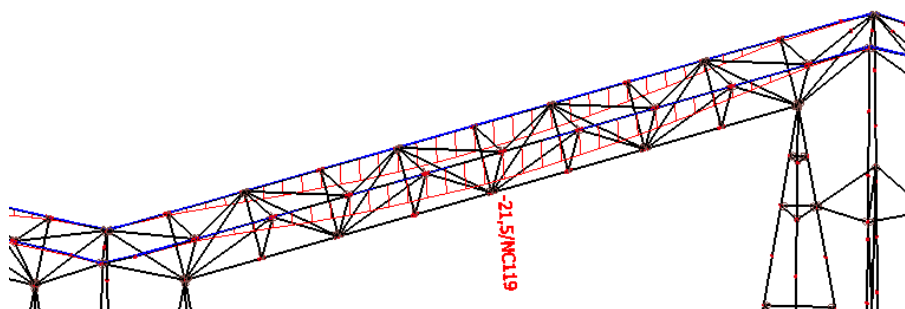
$$\frac{\sqrt{0,67^2 + 0,02^2}}{2,15} \leq 1$$

$$0,31 \leq 1$$

### **MSP – PRŮHYB:**

Délka prvku: L = 27 950 mm

Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb horních pásů je NC119 (ZS1.1 + ZS2.1 + +ZS10.1).



**Ověření průhybů dle (5.4.1) až ( 5.4.10):**

**Okamžitý průhyb:**

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 4,3 + 17,2 = 21,5 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>1</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 17,2 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{27950}{400} = 69,875 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

<sup>1</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení sněhem, které je nejnepříznivější, vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 21,5 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{27950}{300} = 93,17 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 4,3(1 + 2) = 12,9 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 17,2(1 + 0,2 \cdot 2) = 24,08 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} = 12,9 + 24,08 + 0 = 36,98 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 36,98 - 0 = 36,98 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 36,98 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{27950}{250} = 111,8 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 36,98 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{27950}{150} = 186,33 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.4 Dolní pásy

Dolní pásy jsou navrženy obdélníkového průřezu o rozměrech 250x400mm z rostlého dřeva třídy C24. Kritickým posudkem je kombinace tahu s ohybem. Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno že  $\lambda_{rel,m} = 0,30$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Plocha:  $A = b \cdot h = 250 \cdot 400 = 100000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6}bh^2 = 6,67 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6}hb^2 = 4,17 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12}bh^3 = 1,33 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{12}hb^3 = 5,21 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 115,47 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 72,17 \text{ mm}$$

### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximální normálové síly  $N$  s příslušným ohybovým momentem  $M_y$  a příslušným ohybovým momentem  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 524,01 \text{ kN}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přisl} = 9,42 \text{ kNm}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přisl} = 0,41 \text{ kNm}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{524,01}{100000 \cdot 10^{-3}} = 5,24 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{9,42}{6,67 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,41 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,41}{4,17 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,10 \text{ MPa}$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{5,24}{7,54} + \frac{1,41}{12,92} + 0,7 \frac{0,10}{12,92} \leq 1$$

$$0,70 + 0,11 + 0,01 \leq 1$$

$$0,81 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

**MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:**

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 47,52 \text{ kN}$  NC66

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přisl} = 1,09 \text{ kNm}$  NC66

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přisl} = 0,87 \text{ kNm}$  NC66

*Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):*

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{47,52}{100000 \cdot 10^{-3}} = 0,48 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{1,09}{6,67 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,16 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,82}{4,17 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,20 \text{ MPa}$

*Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:*

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 2790 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2790}{72,17} = 38,66$

Poměrný štíhlostní poměr:  $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{38,66}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,656$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,656 - 0,3) + 0,656^2)$

$$k_z = 0,750$$

Součinitel  $k_{c,z}$ :  $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,750 + \sqrt{0,750^2 - 0,656^2}} = 0,896$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$

$$\frac{0,48}{0,896 \cdot 11,31} + 0,7 \frac{0,16}{12,92} + \frac{0,20}{12,92} \leq 1$$

$$0,05 + 0,01 + 0,02 \leq 1$$

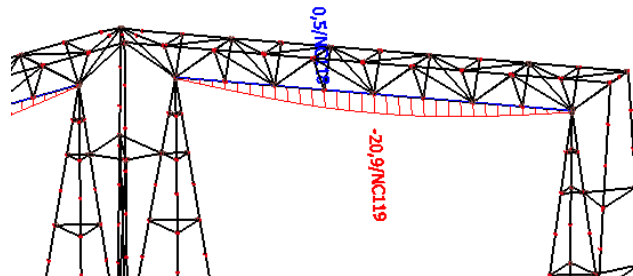
$$0,07 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### **MSP – PRŮHYB:**

Délka prvku:  $L = 22\,320\text{ mm}$

Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb dolních pásů je NC119 (ZS1.1 + ZS2.1 + ZS10.1).



### **Ověření průhybů dle (5.4.1) až (5.4.10):**

#### **Okamžitý průhyb:**

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 4,2 + 16,7 = 20,9\text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>2</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 16,7\text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{22320}{400} = 55,8\text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 20,9\text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{22320}{300} = 74,4\text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### **Konečný průhyb:**

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0\text{ mm}$$

<sup>2</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení sněhem, které je nejnepříznivější vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.



$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 4,2(1 + 2) = 12,6 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 16,7(1 + 0,2 \cdot 2) = 23,38 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} = 12,6 + 23,38 + 0 = 35,98 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 35,98 - 0 = 35,98 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 35,98 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{22320}{250} = 89,28 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 35,98 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{22320}{150} = 148,8 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.5 Diagonály v úrovni mostovky

Diagonály v úrovni mostovky jsou navrženy obdélníkového průřezu o rozměrech 180x200mm z rostlého dřeva třídy C30. Kritickým posudkem je kombinace tahu s ohybem. Byla ověřena taktéž vzpěrná únosnost v kombinaci s ohybem, smyk a průhyb. Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno že  $\lambda_{rel,m} = 0,32$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Plocha:  $A = b \cdot h = 180 \cdot 200 = 36000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6}bh^2 = 1,20 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6}hb^2 = 1,08 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12}bh^3 = 1,20 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{12}hb^3 = 9,70 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 57,74 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 51,96 \text{ mm}$$

### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu k ose y s příslušnou normálovou silou N a příslušným ohybovým momentem  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,max} = 15,28 \text{ kNm}$  NC79

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 5,73 \text{ kN}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 0,07 \text{ kNm}$  NC79

*Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):*

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{5,73}{36000 \cdot 10^{-3}} = 0,16 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{15,28}{1,20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 12,73 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,07}{1,08 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,06 \text{ MPa}$

*Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:*

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,16}{9,69} + \frac{12,73}{16,15} + 0,7 \frac{0,06}{16,15} \leq 1$$

$$0,02 + 0,79 + 0,00 \leq 1$$

$$0,81 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 51,61 \text{ kN}$  NC34

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 4,83 \text{ kNm}$  NC34

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 0,27 \text{ kNm}$  NC34

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{51,61}{36000 \cdot 10^{-3}} = 1,43 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{4,83}{1,20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 4,03 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,27}{1,08 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,25 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,y} = 3490 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{3490}{57,74} = 60,45$

Poměrný štíhlostní poměr:  $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{60,45}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 1,032$

Součinitel  $k_z$ :  $k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,5(1 + 0,2(1,032 - 0,3) + 1,032^2)$

$k_y = 1,105$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,150 + \sqrt{1,150^2 - 1,032^2}} = 0,666$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.36):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,43}{0,666 \cdot 12,38} + \frac{4,03}{16,15} + 0,7 \frac{0,25}{16,15} \leq 1$$

$$0,17 + 0,25 + 0,01 \leq 1$$

$$0,43 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

**MSÚ – Smyk:**

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67 \text{ (RD)}$

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 180 = 120,6 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = h \cdot b_{ef} = 200 \cdot 120,6 = 24120 \text{ mm}^2$$

Vnitřní síly:

Smykové síly:  $V_{Ed,z,max} = 12,98 \text{ kN}$  NC79

$$V_{Ed,y,přísl} = 0,05 \text{ kN} \quad \text{NC79}$$

Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :

Návrhová napětí ve smyku:  $\tau_{d,y} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed,y,přísl}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{0,05}{24120 \cdot 10^{-3}} = 0,00 \text{ MPa}$

$$\tau_{d,z} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed,z,max}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{12,98}{24120 \cdot 10^{-3}} = 0,81 \text{ MPa}$$

Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{0,00^2 + 0,81^2}}{2,15} \leq 1$$

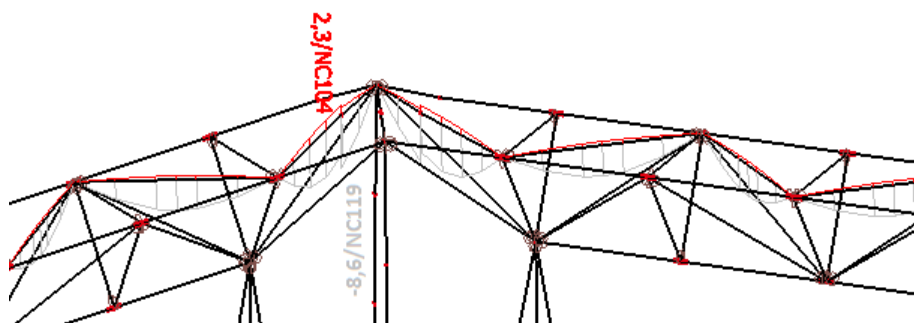
$$0,37 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSP – PRŮHYB:

Délka prvku:  $L = 4015 \text{ mm}$

Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb dolních pásů je NC119 (ZS1.1 + ZS2.1 + ZS10.1).



### OVĚŘENÍ PRŮHYBŮ DLE (5.4.1) AŽ (5.4.10):

#### OKAMŽITÝ PRŮHYB:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 0,7 + 7,9 = 8,6 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>3</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 7,9 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{4015}{400} = 10,04 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 8,6 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{4015}{300} = 13,38 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### KONEČNÝ PRŮHYB:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0,7(1 + 2) = 2,1 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 7,9(1 + 0,2 \cdot 2) = 11,06 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} = 2,1 + 11,06 + 0 = 13,16 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 13,16 - 0 = 13,16 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 13,16 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{4015}{250} = 16,06 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 13,16 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{4015}{150} = 26,767 \text{ mm}$$

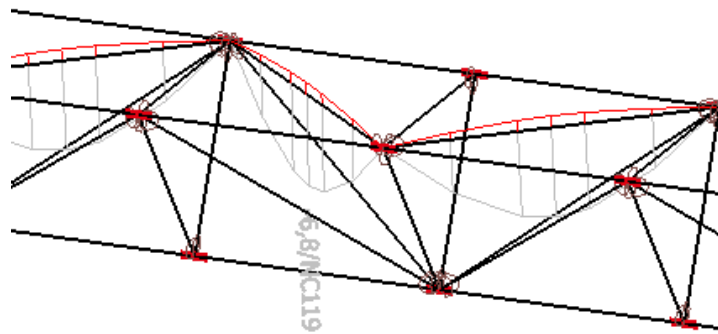
✓✓✓ VYHOVUJE

#### **MSP – PRŮHYB:**

Délka prvku:  $L = 3\,490 \text{ mm}$

Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb dolních pásů je NC119 (ZS1.1 + ZS2.1 + +ZS10.1).

<sup>3</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení sněhem, které je nejnepříznivější, vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.



### Ověření průhybů dle (5.4.1) až (5.4.10):

#### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 0,7 + 6,2 = 6,9 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>4</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 6,9 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{3490}{400} = 8,73 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 6,9 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{3490}{300} = 11,633 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0,7(1 + 2) = 2,1 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 6,2(1 + 0,2 \cdot 2) = 8,68 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} = 2,1 + 8,68 + 0 = 10,78 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 10,78 - 0 = 10,78 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 10,78 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{3490}{250} = 13,96 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

<sup>4</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení sněhem, které je nejnepříznivější, vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 10,78 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{3490}{150} = 23,27 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.6 Diagonály v šikmé rovině

Diagonály v šikmé rovině jsou navrženy obdélníkového průřezu o rozměrech 200x200mm z rostlého dřeva třídy C30. Kritickým posudkem je kombinace vzpěrného tlaku a ohybu. Byla ověřena taktéž únosnost v tahu v kombinaci s ohybem, smyk a průhyb. Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno že  $\lambda_{rel,m} = 0,29$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Plocha:  $A = b \cdot h = 200 \cdot 200 = 40000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 1,33 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 1,33 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 1,33 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 1,33 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 57,74 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 57,74 \text{ mm}$$

**MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:**

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 245,88 \text{ kN}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 0,26 \text{ kNm}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 1,27 \text{ kNm}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{245,88}{40000 \cdot 10^{-3}} = 6,15 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{0,26}{1,33 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,20 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{1,27}{1,33 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,95 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 3575 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{3575}{57,74} = 61,92$

Poměrný štíhlostní poměr:  $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{61,92}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 1,057$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(1,057 - 0,3) + 1,057^2)$

$k_z = 1,134$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,134 + \sqrt{1,134^2 - 1,057^2}} = 0,647$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{6,15}{0,647 \cdot 12,38} + 0,7 \frac{0,20}{16,15} + \frac{0,95}{16,15} \leq 1$$

$$0,77 + 0,01 + 0,06 \leq 1$$

$$0,83 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximální tahové síly N s příslušným ohybovým momentem  $M_z$  a příslušným ohybovým momentem  $M_y$ .



### Vnitřní síly:

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 182,03 \text{ kN}$  NC66

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,max} = 0,32 \text{ kNm}$  NC66

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 0,28 \text{ kNm}$  NC66

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{182,03}{40000 \cdot 10^{-3}} = 4,55 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{0,28}{1,20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,21 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,32}{1,08 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,24 \text{ MPa}$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.25) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{4,55}{9,69} + 0,7 \frac{0,21}{16,15} + \frac{0,24}{16,15} \leq 1$$

$$0,47 + 0,1 + 0,01 \leq 1$$

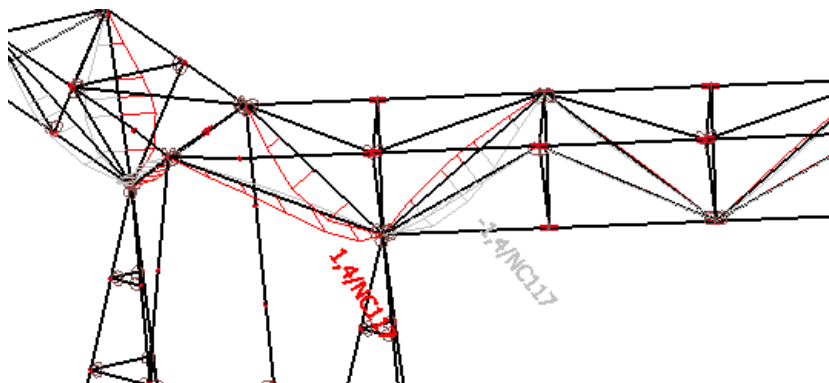
$$0,81 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSP – PRŮHYB:

Délka prvku:  $L = 3590 \text{ mm}$

Nejnepříznivější průhyb byl vyvolán ve směru y a to kombinací NC119 (ZS1.1 + ZS2.1 + +ZS4.0,4+ZS9.1).



### OVĚŘENÍ PRŮHYBŮ DLE (5.4.1) AŽ (5.4.10):

#### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} + w_{inst,Q_2} \cdot \psi_{0,2} = 0,1 + 1,2 + 0,3 \cdot 0,4 = 1,42 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou:

$$w_{inst,Q_1} = 0,3 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{3590}{400} = 8,98 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 1,42 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{3590}{300} = 11,97 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) = 0,1(1 + 2) = 0,3 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) = 1,2(1 + 0,2) = 1,2 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_2} = w_{inst,Q_2} (1 + \psi_{2,1} k_{def}) = 0,12(1 + 0,2) = 0,12 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_2} = 0,3 + 1,2 + 0,12 = 1,62 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 1,62 - 0 = 1,62 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 1,62 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{3590}{250} = 14,36 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 1,62 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{3590}{150} = 23,933 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.7 Příčníky krajní

Krajní příčníky odolávají vyšším hodnotám zatížení, než příčníky uvnitř pole, a proto jsou navrženy rozdílné průřezy pro úsporu materiálu. Krajní příčníky jsou z řeziva třídy C24 o rozměrech 180 x 200 mm. Kritickým posudkem se stal tah v kombinaci s ohybem. Byly

ověřeny rovněž další druhy posouzení, jako například, smyk, vzpěrný tlak s ohybem a průhyb. Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo také ověřeno že  $\lambda_{rel,m} = 0,26$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Plocha:  $A = b \cdot h = 180 \cdot 200 = 36000 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 1,20 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 1,08 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 1,20 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 9,70 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 57,74 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 51,96 \text{ mm}$$

**MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu**

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu k ose y s příslušnou normálovou silou N a příslušným ohybovým momentem  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,max} = 5 \text{ kNm}$  NC79

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 127,92 \text{ kN}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 0,04 \text{ kNm}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{127,92}{36000 \cdot 10^{-3}} = 3,29 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{5}{1,20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 2,49 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,04}{1,08 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,04 \text{ MPa}$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{3,29}{7,54} + \frac{2,49}{12,92} + 0,7 \frac{0,04}{12,92} \leq 1$$

$$0,47 + 0,32 + 0,00 \leq 1$$

$$0,80 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

**MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:**

Vnitřní síly:

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 37,48 \text{ kN}$  NC66

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 0 \text{ kNm}$  NC66

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 1,33 \text{ kNm}$  NC66

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{37,48}{36000 \cdot 10^{-3}} = 1,04 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{0}{1,20 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{1,33}{1,08 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,23 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 2425 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2425}{57,74} = 46,67$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{46,67}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,791$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,791 - 0,3) + 0,791^2)$   
 $k_z = 0,862$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,862 + \sqrt{0,862^2 - 0,791^2}} = 0,830$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,04}{0,830 \cdot 11,31} + 0,7 \frac{0}{12,92} + \frac{1,23}{12,92} \leq 1$$

$$0,11 + 0,0 + 0,10 \leq 1$$

$$0,21 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Smyk:

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67$  (RD)  
 $b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 180 = 120,6 \text{ mm}$   
 $A_{ef} = h \cdot b_{ef} = 200 \cdot 120,6 = 24120 \text{ mm}^2$

Vnitřní síly:

Smykové síly:  $V_{Ed,z,max} = 7,6 \text{ kN}$  NC79  
 $V_{Ed,y,přísl} = 0,06 \text{ kN}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :

Návrhová napětí ve smyku:  $\tau_{d,y} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed,y,přísl}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{0,06}{24120 \cdot 10^{-3}} = 0,00 \text{ MPa}$   
 $\tau_{d,z} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed,z,max}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{7,6}{24120 \cdot 10^{-3}} = 0,47 \text{ MPa}$

Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{0,00^2 + 0,47^2}}{2,15} \leq 1$$

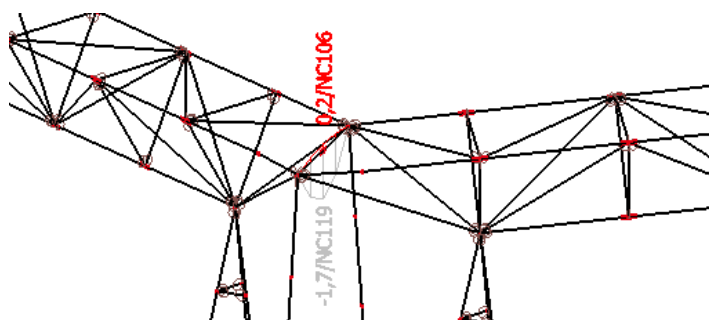
$$0,22 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSP – PRŮHYB:

Délka prvku:  $L = 2425 \text{ mm}$

Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb krajních příčníků je NC119 (ZS1.1 + ZS2.1 + ZS10.1).



### Ověření průhybů dle (5.4.1) až ( 5.4.10):

#### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 0,1 + 1,6 = 1,7 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>5</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 1,6 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{2425}{400} = 6,06 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 1,7 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{2425}{300} = 8,08 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

<sup>5</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení sněhem, které je nejnepříznivější, vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.

### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0,1(1 + 2) = 0,3 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 1,6(1 + 0,2 \cdot 2) = 2,24 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} = 0,3 + 2,24 + 0 = 2,54 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 2,54 - 0 = 2,54 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 2,54 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{2425}{250} = 9,7 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 13,16 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{2425}{150} = 16,167 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.8 Příčnický vnitřní

Vnitřní příčnický odolávají nižším hodnotám zatížení, než příčnický vnější, a proto došlo k redukci průřezu pro úsporu materiálu. Vnitřní příčnický jsou z řeziva třídy C24 o rozměrech 120 x 180 mm. Kritickým posudkem se stal tah v kombinaci s ohybem. Byly ověřeny rovněž další druhy posouzení, jako například, smyk, vzpěrný tlak s ohybem a průhyb. Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo také ověřeno že  $\lambda_{rel,m} = 0,36$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Plocha:  $A = b \cdot h = 120 \cdot 180 = 21600 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6}bh^2 = 6,48 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6}hb^2 = 4,32 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12}bh^3 = 5,83 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{12}hb^3 = 2,59 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 51,96 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 34,64 \text{ mm}$$

### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximální osová síla s příslušným ohybovým momentem  $M_y$  a  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $N_{Edmax} = 22,82 \text{ kN}$  NC79

Normálová síla:  $M_{Ed,y,max} = 4,38 \text{ kNm}$  NC79

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přisl} = 0,02 \text{ kNm}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{22,82}{21600 \cdot 10^{-3}} = 1,06 \text{ Pa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{4,38}{6,48 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 6,72 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,02}{4,32 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 0,05 \text{ MPa}$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,06}{7,54} + \frac{6,72}{12,92} + 0,7 \frac{0,05}{12,92} \leq 1$$

$$0,14 + 0,52 + 0,00 \leq 1$$

$$0,67 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE



### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

Vnitřní síly:

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 5,62 \text{ kN}$  NC64

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 0,72 \text{ kNm}$  NC64

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 0,06 \text{ kNm}$  NC64

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{5,62}{21600 \cdot 10^{-3}} = 0,26 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{0,72}{6,48 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 1,11 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,06}{4,32 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 0,14 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,y} = 2425 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2425}{51,96} = 46,67$

Poměrný štíhlostní poměr:  $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{46,67}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,791$

Součinitel  $k_y$ :  $k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,791 - 0,3) + 0,791^2)$   
 $k_y = 0,862$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,862 + \sqrt{0,862^2 - 0,791^2}} = 0,830$

Podmínka spolehlivosti dle( 5.4.36):  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$

$$\frac{0,26}{0,830 \cdot 11,31} + 0,7 \frac{1,11}{12,92} + \frac{0,14}{12,92} \leq 1$$

$$0,03 + 0,09 + 0,01 \leq 1$$

$$0,21 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Smyk:

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67$  (RD)

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 120 = 80,4 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = h \cdot b_{ef} = 180 \cdot 80,4 = 14472 \text{ mm}^2$$

Vnitřní síly:

Smykové síly:  $V_{Ed,z,max} = 7,25 \text{ kN}$  NC79

$V_{Ed,y,přísl} = 0,32 \text{ kN}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :

$$\text{Návrhová napětí ve smyku: } \tau_{d,y} = \frac{3 V_{Ed,y,přísl}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{0,32}{14472 \cdot 10^{-3}} = 0,03 \text{ MPa}$$

$$\tau_{d,z} = \frac{3 V_{Ed,z,max}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{7,25}{14472 \cdot 10^{-3}} = 0,75 \text{ MPa}$$

Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{0,03^2 + 0,75^2}}{2,15} \leq 1$$

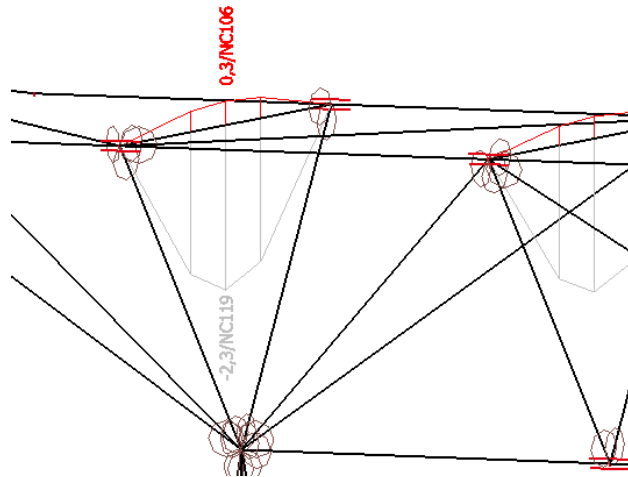
$$0,35 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSP – PRŮHYB:

Délka prvku:  $L = 2100 \text{ mm}$

Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb krajních příčníků je NC119 (ZS1.1 + ZS2.1 + ZS10.1).



### Ověření průhybů dle (5.4.1) až (5.4.10):

#### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 0,2 + 2,1 = 2,3 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>6</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 2,1 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{2100}{400} = 5,25 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 2,3 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{2100}{300} = 7 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0,2(1 + 2) = 0,6 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 2,1(1 + 0,2 \cdot 2) = 2,94 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_i} = 0,6 + 2,94 + 0 = 3,54 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 3,54 - 0 = 3,54 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 3,54 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{2100}{250} = 8,4 \text{ mm}$$

<sup>6</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení sněhem, které je nejnepriznivější, vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 3,54 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{2100}{150} = 14 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.9 Svislice

Svislice jsou navrženy z řeziva třídy C24 o rozměrech 120x160 mm. Kritickým posudkem je vzpěrný tlak. Vzhledem k nízké hodnotě okamžitého průhybu ( $u_y=0,2$ ,  $u_z=0,1$ ) nebylo nutné průhyb ověřovat. Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno, že  $\lambda_{rel,m} = 0,33$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Plocha:  $A = b \cdot h = 120 \cdot 160 = 19200 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{1}{6} b h^2 = 5,12 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{1}{6} h b^2 = 3,84 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{12} b h^3 = 4,10 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{12} h b^3 = 2,30 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 46,19 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 34,64 \text{ mm}$$

**MSÚ – Vzpěrný tlak:**

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 69,21 \text{ kN}$  NC79

*Návrhová napětí dle ( 5.4.15):*

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{69,21}{19200 \cdot 10^{-3}} = 3,60 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 2260 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2260}{34,64} = 65,24$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{65,24}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 1,106$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(1,106 - 0,3) + 1,106^2)$

$$k_z = 1,193$$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{1,193 + \sqrt{1,193^2 - 1,106^2}} = 0,611$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.36):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{3,60}{0,611 \cdot 11,31} + 0 + 0 \leq 1$$

$$0,52 + 0,00 + 0,00 \leq 1$$

$$0,52 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

## 6.6.10 Sloupy typu „trojnožka“

Vzhledem k proměnnému kruhovému průřezu sloupů ( $\varnothing$  290 mm až 500 mm) a rozdílným vzpěrným délkám byly sloupy posouzeny ve čtyřech řezech. Všechny sloupy jsou z řeziva třídy C30. Sloupy byly posouzeny na ohyb v kombinaci se vzpěrným tlakem, ohyb v kombinaci s tahem, dvojsoý smyk a průhyb.

### 6.6.10.1 Posouzení sloupu v místě průřezu o průměru 290 mm

Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno, že  $\lambda_{rel,m} = 0,24$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Poloměr:  $r = 145 \text{ mm}$

Plocha:  $A = \pi r^2 = 66052 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:

$$W_y = \frac{\pi d^3}{32} = 2,39 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_z = \frac{\pi d^3}{32} = 2,39 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:

$$I_y = \frac{1}{4} \pi r^4 = 3,47 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_z = \frac{1}{4} \pi r^4 = 3,47 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 72,5 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 72,5 \text{ mm}$$

### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximální normálové síly  $N$  a příslušného ohybového momentu  $M_y$  a  $M_z$ .

#### Vnitřní síly:

Ohybový moment:  $N_{Ed,max} = 192,56 \text{ kN}$  NC78

Normálová síla:  $M_{Ed,y,přísl} = 7,6 \text{ kNm}$  NC78

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 3,9 \text{ kNm}$  NC78

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{192,56}{66052 \cdot 10^{-3}} = 2,92 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{7,6}{2,39 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 3,17 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{3,9}{2,39 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,63 \text{ MPa}$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24)( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{2,92}{9,69} + \frac{3,17}{16,15} + 0,7 \frac{1,63}{16,15} \leq 1$$

$$0,30 + 0,20 + 0,07 \leq 1$$

$$0,57 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

Maximální účinky vyvolala kombinace maximální normálové síly  $N$  a příslušného ohybového momentu  $M_y$  a  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 329,72 \text{ kN}$  NC52

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 10,45 \text{ kNm}$  NC52

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 0 \text{ kNm}$  NC52

*Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):*

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{329,72}{66052 \cdot 10^{-3}} = 4,99 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{10,45}{2,39 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 4,36 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0}{2,39 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0 \text{ MPa}$

*Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:*

Vzpěrná délka:  $L_{cr,y} = 2150 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2150}{72,50} = 29,66$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{229,66}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 0,506$$

Součinitel  $k_y$ :  $k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,506 - 0,3) + 0,506^2)$

$$k_y = 0,649$$

Součinitel  $k_{cy}$ :  $k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{0,649 + \sqrt{0,649^2 - 0,506^2}} = 0,948$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.36) :

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{4,99}{0,948 \cdot 12,38} + \frac{4,36}{16,15} + 0,7 \frac{0}{16,15} \leq 1$$

$$0,43 + 0,27 + 0,00 \leq 1$$

$$0,70 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

**MSÚ – Smyk:**

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67 (RD)$

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 290 = 194,3 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = \pi r^2 = \pi \cdot 97,15^2 = 29651 \text{ mm}^2$$

*Vnitřní síly:*

Smykové síly:  $V_{Ed,y,max} = 9,73 \text{ kN}$  NC77

$V_{Ed,z,přísl} = 4,07 \text{ kN}$  NC77

*Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :*

Návrhová napětí ve smyku:  $\tau_{d,y} = \frac{3 V_{Ed,y,max}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3 \cdot 9,73}{2 \cdot 29651 \cdot 10^{-3}} = 0,49 \text{ MPa}$

$$\tau_{d,z} = \frac{3 V_{Ed,z,přísl}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3 \cdot 4,07}{2 \cdot 29651 \cdot 10^{-3}} = 0,21 \text{ MPa}$$



Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{0,49^2 + 0,21^2}}{2,15} \leq 1$$

$$0,25 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

**MSÚ – Ztráta příčné a torzní stability**

$$L = 2\,150\,mm$$

$$E_{0,05} = 8\,000\,MPa$$

$$G_{mean} = 750\,MPa$$

$$G_{0,05} = 0,67 \cdot G_{mean} = 502,5\,MPa$$

$$W_y = \frac{\pi d^3}{32} = 2,39 \cdot 10^6 mm^3$$

$$I_z = 3,47 \cdot 10^8 mm^4$$

$$I_{tor} = \frac{\pi \cdot d^4}{32} = \frac{\pi \cdot 290^4}{32} = 6,94 \cdot 10^8 mm^4$$

$$l_{ef}/l = 0,9 \quad \text{pro prostě podepřený nosník a spojitě zatížení dle tab. 6.1 v [5]}$$

$$l_{ef} = L \cdot 0,9 + 2 \cdot d = 2150 \cdot 0,9 + 2 \cdot 290 = 2515\,mm$$

$$f_{m,k} = 30\,MPa$$

Kritické napětí v ohybu pro jiné než obdélníkové celistvé průřezy:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{tor}}}{l_{ef} W_y} = 514\,MPa$$

Poměrné štíhlosti v ohybu:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,24 \quad (6.6.1)$$

Součinitel  $k_{krit}$ :

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{pro } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{pro } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{pro } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (6.6.2)$$

$k_{krit} = 1 \rightarrow$  *NEDOCHÁZÍ KE ZTRÁTĚ PŘÍČNÉ A TORZNÍ STABILITY.*

#### 6.6.10.2 Posouzení sloupu v místě průřezu o průměru 320 mm

Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno, že  $\lambda_{rel,m} = 0,23$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Poloměr:  $r = 160 \text{ mm}$

Plocha:  $A = \pi r^2 = 80425 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{\pi d^3}{32} = 3,22 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{\pi d^3}{32} = 3,22 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{4} \pi r^4 = 5,15 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{4} \pi r^4 = 5,15 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 80 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 80 \text{ mm}$$

#### **MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu**

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu  $M_y$  a příslušné normálové síly  $N$  s příslušným ohybovým momentem  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,max} = 25,65 \text{ kNm}$  NC52

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 21,06 \text{ kN}$  NC52

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 0,02 \text{ kNm}$  NC52

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{21,06}{80425 \cdot 10^{-3}} = 0,26 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{25,65}{3,22 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 7,97 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,02}{3,22 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,01 \text{ MPa}$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24) ( 5.4.37):  $\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$

$$\frac{0,26}{9,69} + \frac{7,97}{16,15} + 0,7 \frac{0,01}{16,15} \leq 1$$

$$0,03 + 0,49 + 0,00 \leq 1$$

$$0,52 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

Maximální účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu  $M_z$  a příslušné normálové síly  $N$  s příslušným ohybovým momentem  $M_y$ .

Vnitřní síly:

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,max} = 21,9 \text{ kNm}$  NC56

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 141,03 \text{ kN}$  NC56

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 12,79 \text{ kNm}$  NC56

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{141,03}{80425 \cdot 10^{-3}} = 1,75 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{12,79}{3,22 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 3,98 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{21,9}{3,22 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 6,81 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 2220 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2220}{80} = 27,75$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{27,75}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 0,474$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,474 - 0,3) + 0,474^2)$

$$k_z = 0,630$$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,630 + \sqrt{0,630^2 - 0,474^2}} = 0,958$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,75}{0,958 \cdot 12,38} + 0,7 \frac{3,98}{16,15} + \frac{6,81}{16,15} \leq 1$$

$$0,15 + 0,17 + 0,42 \leq 1$$

$$0,74 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

**MSÚ – Smyk:**

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67 \text{ (RD)}$

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 320 = 214,4 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = \pi r^2 = \pi \cdot 107,2^2 = 36103 \text{ mm}^2$$

*Vnitřní síly:*

Smykové síly:  $V_{Ed,y,max} = 7,99 \text{ kN}$  NC66

$V_{Ed,z,přisl} = 0,01 \text{ kN}$  NC66

Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :

$$\text{Návrhová napětí ve smyku: } \tau_{d,y} = \frac{3 V_{Ed,y,max}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3 \cdot 0,01}{2 \cdot 36103 \cdot 10^{-3}} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$\tau_{d,z} = \frac{3 V_{Ed,z,přisl}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3 \cdot 7,99}{2 \cdot 36103 \cdot 10^{-3}} = 0,33 \text{ MPa}$$

Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{0^2 + 0,33^2}}{2,15} \leq 1$$

$$0,15 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.10.3 Posouzení sloupu v místě průřezu o průměru 350 mm

Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno, že  $\lambda_{rel,m} = 0,30$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability. Vzhledem k nízkým hodnotám smykových sil, není posouzení kritickým a není zde výpočet uveden.

- Průřezové charakteristiky:

Poloměr:  $r = 175 \text{ mm}$

Plocha:  $A = \pi r^2 = 96211 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{\pi d^3}{32} = 4,21 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{\pi d^3}{32} = 4,21 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{4} \pi r^4 = 7,37 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{4} \pi r^4 = 7,37 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 87,50 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 87,50 \text{ mm}$$

### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu  $M_z$  a příslušné normálové síly  $N$  s příslušným ohybovým momentem  $M_y$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,max} = 23,78 \text{ kNm}$  NC66

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 102,17 \text{ kN}$  NC66

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 14,07 \text{ kNm}$  NC66

*Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):*

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{102,17}{96211 \cdot 10^{-3}} = 1,06 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{14,07}{4,21 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 3,34 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{23,78}{4,21 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 5,65 \text{ MPa}$

*Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:*

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.25) ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,06}{9,69} + 0,7 \frac{3,34}{16,15} + \frac{5,65}{16,15} \leq 1$$

$$0,11 + 0,14 + 0,35 \leq 1$$

$$0,60 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

Maximální účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu  $M_z$  a příslušné normálové síly  $N$  s příslušným ohybovým momentem  $M_y$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,max} = 30,79 \text{ kNm}$  NC73

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 151,34 \text{ kN}$  NC73

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 19,02 \text{ kNm}$  NC73

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny: 
$$\sigma_{c,0,d} = \frac{151,34}{96211 \cdot 10^{-3}} = 1,57 \text{ MPa}$$

Návrhové napětí v ohybu k ose y: 
$$\sigma_{m,y,d} = \frac{19,02}{4,21 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 4,52 \text{ MPa}$$

Návrhové napětí v ohybu k ose z: 
$$\sigma_{m,z,d} = \frac{30,79}{4,21 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 7,31 \text{ MPa}$$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka: 
$$L_{cr,z} = 4290 \text{ mm}$$

Štíhlostní poměr: 
$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{4290}{87,5} = 49,03$$

Poměrný štíhlostní poměr: 
$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{49,03}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 0,837$$

Součinitel  $k_z$ : 
$$k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,837 - 0,3) + 0,837^2)$$
  
$$k_z = 0,904$$

Součinitel  $k_{cz}$ : 
$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,904 + \sqrt{0,904^2 - 0,837^2}} = 0,803$$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,57}{0,803 \cdot 12,38} + 0,7 \frac{4,52}{16,15} + \frac{7,31}{16,15} \leq 1$$

$$0,16 + 0,20 + 0,45 \leq 1$$

$$0,81 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### 6.6.10.4 Posouzení sloupu v místě průřezu o průměru 410 mm

Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno, že  $\lambda_{rel,m} = 0,28$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Poloměr:  $r = 205 \text{ mm}$

Plocha:  $A = \pi r^2 = 132025 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{\pi d^3}{32} = 6,77 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{\pi d^3}{32} = 6,77 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{4} \pi r^4 = 1,39 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{4} \pi r^4 = 1,39 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 102,50 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 102,5 \text{ mm}$$

#### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu  $M_y$  a příslušné normálové síly  $N$  s příslušným ohybovým momentem  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,max} = 36,58 \text{ kNm}$  NC54

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 102,88 \text{ kN}$  NC54

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 0,00 \text{ kNm}$  NC54

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{102,88}{132025 \cdot 10^{-3}} = 0,78 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{36,58}{6,77 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 5,41 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{0,00}{6,77 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,00 \text{ MPa}$



Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24)( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,78}{9,69} + \frac{5,41}{16,15} + 0,7 \frac{0,00}{16,15} \leq 1$$

$$0,08 + 0,33 + 0,00 \leq 1$$

$$0,42 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

Maximální účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu  $M_z$  a příslušné normálové síly  $N$  s příslušným ohybovým momentem  $M_y$ .

Vnitřní síly:

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,max} = 31,89 \text{ kNm}$  NC73

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 148,34 \text{ kN}$  NC73

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 19,71 \text{ kNm}$  NC73

Návrhové napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{148,34}{132025 \cdot 10^{-3}} = 1,12 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{19,71}{6,77 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 2,91 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{31,89}{6,77 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 4,71 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 4300 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{4300}{102,5} = 41,95$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{41,95}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 0,716$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(0,716 - 0,3) + 0,716^2)$

$$k_z = 0,798$$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,798 + \sqrt{0,798^2 - 0,716^2}} = 0,869$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,12}{0,869 \cdot 12,38} + 0,7 \frac{2,91}{16,15} + \frac{4,71}{16,15} \leq 1$$

$$0,10 + 0,13 + 0,29 \leq 1$$

$$0,52 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Smyk:

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67$  (RD)

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 410 = 274,7 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = \pi r^2 = \pi \cdot 137,35^2 = 59266 \text{ mm}^2$$

Vnitřní síly:

Smykové síly:  $V_{Ed,z,max} = 15,72 \text{ kN}$  NC54

$V_{Ed,z,přísl} = 0,01 \text{ kN}$  NC54

Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :

$$\text{Návrhová napětí ve smyku: } \tau_{d,y} = \frac{3 V_{Ed,y,max}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3 \cdot 0,01}{2 \cdot 59266 \cdot 10^{-3}} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$\tau_{d,z} = \frac{3 V_{Ed,z,přísl}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3 \cdot 15,72}{2 \cdot 59266 \cdot 10^{-3}} = 0,40 \text{ MPa}$$

Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{0^2 + 0,40^2}}{2,15} \leq 1$$

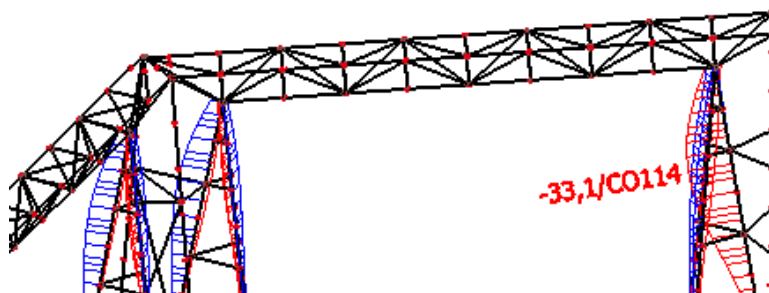
$$0,18 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.10.5 MSP – PRŮHYB: pro sloupy typu „trojnožka“

Délka prvku:  $L = 22\,320\text{ mm}$

Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb sloupů typu „trojnožka“ je CO114 (ZS1.1 + ZS2.1 + ZS3.0,4+ZS9.1).



**Ověření průhybů dle (5.4.1) až ( 5.4.10):**

**Okamžitý průhyb:**

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} + w_{inst,Q_2} \cdot \psi_{0,2} = 0 + 32,7 + 1,1 \cdot 0,4 = 33,14\text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>7</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 33,14\text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{22320}{400} = 55,80\text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 33,14\text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{22320}{300} = 74,4\text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

<sup>7</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení sněhem, které je nejnepříznivější, vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.

### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0(1 + 2) = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 32,7(1 + 0,2) = 32,7 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_2} = w_{inst,Q_2}(1 + \psi_{2,2}k_{def}) = 0,44(1 + 0,2) = 0,44 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_2} = 0 + 32,7 + 0,44 = 33,14 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 33,14 - 0 = 33,14 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 36,98 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{22320}{250} = 89,28 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 36,98 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{22320}{150} = 148,8 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.11 Sloupy typu „roznožka“

Vzhledem k proměnnému kruhovému průřezu sloupů ( $\emptyset$  260 mm až 500 mm resp.  $\emptyset$  290 mm až 500 mm) a rozdílným vzpěrným délkám byly sloupy posouzeny ve dvou řezech. Všechny sloupy jsou z řeziva třídy C30. Sloupy byly posouzeny na ohyb v kombinaci se vzpěrným tlakem, ohyb v kombinaci s tahem, dvojosý smyk a průhyb.

#### 6.6.11.1 Posouzení sloupu v místě průřezu o průměru 290 mm

Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno, že  $\lambda_{rel,m} = 0,39$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Poloměr:  $r = 130 \text{ mm}$

Plocha:  $A = \pi r^2 = 53093 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{\pi d^3}{32} = 1,73 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{\pi d^3}{32} = 1,73 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{4} \pi r^4 = 2,24 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{4} \pi r^4 = 2,24 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 65 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 65 \text{ mm}$$

### MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximálního momentu  $M_z$  s příslušnou normálovou silou  $N$  a příslušným ohybovým momentem  $M_y$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $N_{\text{Ed,přisl}} = 50,07 \text{ kN}$  NC52

Normálová síla:  $M_{\text{Ed,y,přisl}} = 0,35 \text{ kNm}$  NC52

Ohybový moment:  $M_{\text{Ed,z,max}} = 18,04 \text{ kNm}$  NC52

Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{50,07}{53093 \cdot 10^{-3}} = 0,94 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{0,35}{1,73 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,20 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{18,04}{1,73 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 10,45 \text{ MPa}$

Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.25) ( 5.4.37):  $\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$

$$\frac{0,94}{9,69} + 0,7 \frac{0,20}{16,15} + \frac{10,45}{16,15} \leq 1$$

$$0,10 + 0,01 + 0,65 \leq 1$$

$$0,75 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

Maximální účinky vyvolala kombinace maximální normálové síly  $N$  a příslušného ohybového momentu  $M_y$  a  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 81,66 \text{ kN}$  NC72

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přísl} = 0,77 \text{ kNm}$  NC72

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 3,75 \text{ kNm}$  NC72

*Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):*

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{81,66}{53093 \cdot 10^{-3}} = 1,54 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{0,77}{1,73 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 0,45 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{3,75}{1,73 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 2,17 \text{ MPa}$

*Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:*

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 6\,460 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{6460}{65} = 99,38$

Poměrný štíhlostní poměr:  $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{99,38}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 1,696$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(1,696 - 0,3) + 1,696^2)$   
 $k_z = 2,078$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,078 + \sqrt{2,078^2 - 1,696^2}} = 0,305$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.36):  $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$

$$\frac{1,54}{0,305 \cdot 12,38} + 0,7 \frac{0,45}{16,15} + \frac{2,17}{16,15} \leq 1$$

$$0,41 + 0,02 + 0,13 \leq 1$$

$$0,56 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Smyk:

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67$  (RD)

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 260 = 174,2 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = \pi r^2 = \pi \cdot 97,15^2 = 23833 \text{ mm}^2$$

Vnitřní síly:

Smykové síly:  $V_{Ed,z,max} = 6,89 \text{ kN}$  NC77

$V_{Ed,y,přísl} = 3,49 \text{ kN}$  NC77

Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :

$$\text{Návrhová napětí ve smyku: } \tau_{d,y} = \frac{3 V_{Ed,z,max}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{6,89}{23833 \cdot 10^{-3}} = 0,22 \text{ MPa}$$

$$\tau_{d,z} = \frac{3 V_{Ed,y,přísl}}{2 A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{3,49}{23833 \cdot 10^{-3}} = 0,43 \text{ MPa}$$

Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{0,43^2 + 0,22^2}}{2,15} \leq 1$$

$$0,23 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.11.2 Posouzení sloupu v místě průřezu o průměru 350 mm

Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno, že  $\lambda_{rel,m} = 0,50$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability. Vzhledem k nízkým hodnotám smykových sil (využití 5%), není posouzení kritické a není zde výpočet uveden.

- Průřezové charakteristiky:

Poloměr:  $r = 175 \text{ mm}$

Plocha:  $A = \pi r^2 = 96211 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{\pi d^3}{32} = 4,21 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

$W_z = \frac{\pi d^3}{32} = 4,21 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{4} \pi r^4 = 7,37 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

$I_z = \frac{1}{4} \pi r^4 = 7,37 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 87,50 \text{ mm}$

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 87,50 \text{ mm}$

**MSÚ - Kombinace ohybu a osového tahu**

Nejnepříznivější účinky vyvolala kombinace maximálního ohybového momentu  $M_y$  a příslušné normálové síly  $N$  s příslušným ohybovým momentem  $M_z$ .

*Vnitřní síly:*

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,max} = 17,26 \text{ kNm}$  NC48

Normálová síla:  $N_{Ed,přísl} = 94,21 \text{ kN}$  NC48

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přísl} = 10,06 \text{ kNm}$  NC48

*Návrhová napětí dle ( 5.4.13), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):*

Návrhové napětí v tahu // s vlákny:  $\sigma_{t,0,d} = \frac{94,21}{96211 \cdot 10^{-3}} = 0,98 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{17,26}{4,21 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 4,10 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{10,06}{4,21 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 2,39 \text{ MPa}$

*Posouzení tahu v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.6:*

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.24)( 5.4.37):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$



$$\frac{0,98}{9,69} + 0,7 \frac{4,10}{16,15} + \frac{2,39}{16,15} \leq 1$$

$$0,10 + 0,25 + 0,10 \leq 1$$

$$0,46 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:

Maximální účinky vyvolala kombinace maximální normálové síly  $N$  s příslušnými ohybovými momenty  $M_z$  a  $M_y$ .

Vnitřní síly:

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přisl} = 7,81 \text{ kNm}$  NC72

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 88,9 \text{ kN}$  NC72

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přisl} = 13,56 \text{ kNm}$  NC73

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{88,9}{96211 \cdot 10^{-3}} = 0,92 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose y:  $\sigma_{m,y,d} = \frac{13,56}{4,21 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 3,22 \text{ MPa}$

Návrhové napětí v ohybu k ose z:  $\sigma_{m,z,d} = \frac{7,81}{4,21 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,86 \text{ MPa}$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka:  $L_{cr,z} = 12810 \text{ mm}$

Štíhlostní poměr:  $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{12810}{87,5} = 146,40$

Poměrný štíhlostní poměr:

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{146,40}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 2,499$$

Součinitel  $k_z$ :  $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(2,499 - 0,3) + 2,499^2)$   
 $k_z = 3,842$

Součinitel  $k_{cz}$ :  $k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{3,842 + \sqrt{3,842^2 - 2,499^2}} = 0,148$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.36):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,92}{0,148 \cdot 12,38} + \frac{3,22}{16,15} + 0,7 \frac{1,86}{16,15} \leq 1$$

$$0,50 + 0,20 + 0,08 \leq 1$$

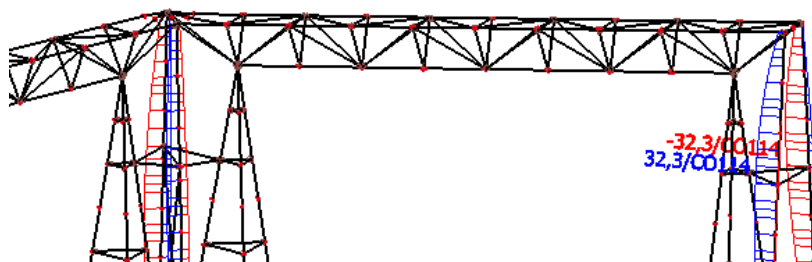
$$0,78 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.11.3 MSP – PRŮHYB: pro sloupý typu „roznožka“

Délka prvku:  $L = 19\,200\text{ mm}$

Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb sloupů typu „trojnožka“ je CO114 (ZS1.1 + ZS2.1 + ZS3.0,4+ZS9.1).



**Ověření průhybů dle (5.4.1) až ( 5.4.10):**

**Okamžitý průhyb:**

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} + w_{inst,Q_2} \cdot \psi_{0,2} = -0,1 + 31,7 + 1,6 \cdot 0,4$$

$$w_{inst,celk} = 32,24\text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>8</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 31,7 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{19200}{400} = 48 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 32,24 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{19200}{300} = 64 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = -0,1(1 + 2) = -0,3 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 31,7(1 + 0,2) = 38,04 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_2} = w_{inst,Q_2}(\psi_{0,i} + \psi_{2,2}k_{def}) = 1,6(0,4 + 0,2) = 0,96 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} + w_{fin,Q_2} = -0,3 + 38,04 + 0,96 = 38,7 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 38,7 - 0 = 38,7 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 38,7 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{19200}{250} = 76,8 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 38,7 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{19200}{150} = 128 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

<sup>8</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení větrem, které je nejnepriznivější, vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.

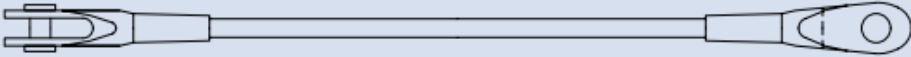
## 6.6.12 Táhla

Návrh: táhla systému MACCALOY 460

Závit: M16

**Tabulka 1: Vlastnosti táhel Macalloy ve standardním provedení a v nerez provedení**

Závit	jednotka	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M76	M85	M90*	M100*
Průměr táhla	mm	10	11	15	19	22	28	34	39	45	52	60	72	82	87	97
Minimální mez kluzu	kN	25	36	69	108	156	249	364	501	660	912	1204	1756	2239	2533	3172
Minimální mez pevnosti	kN	33	48	91	143	207	330	483	665	875	1209	1596	2329	2969	3358	4206
Hmotnost táhla	Kg/m	0,50	0,75	1,40	2,20	3,00	4,80	7,10	9,40	12,50	16,70	22,20	32,00	41,50	46,70	58,00



Obr. č. 72: Vlastnosti táhel Macalloy [76]

### Materiálové charakteristiky lana:

Průměr lana:  $d = 15 \text{ mm}$

Modul pružnosti:  $E = 190\,000 \text{ MPa}$

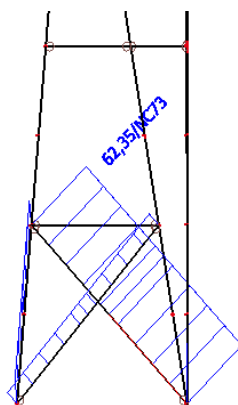
Mez kluzu:  $f_y = 460 \text{ MPa}$

Mez pevnosti:  $f_y = 610 \text{ MPa}$

Minimální tažnost: 15%

Jmenovitá únosnost dle výrobce:  $N_{Rd} = 69 \text{ kN}$

Návrhová normálová síla:  $N_{Ed,max} = 62,32 \text{ kN (NC73)}$



Posouzení v tahu:

$$N_{Ed} = 62,35 \text{ kN} \leq N_{Rd} = 69 \text{ kN}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.6.13 Dřevěné ztužení sloupů

Ztužení sloupů je navrženo z řeziva třídy C30 s kruhovým průřezem. Maximální účinky vyvolala kombinace vzpěrného tlaku s příslušnými ohybovými momenty  $M_z$  a  $M_y$ . Výpočtem dle odst. (5.4.2.9) bylo ověřeno, že  $\lambda_{rel,m} = 0,32$  a nedochází tedy ke ztrátě příčné a torzní stability.

- Průřezové charakteristiky:

Poloměr:  $r = 60 \text{ mm}$

Plocha:  $A = \pi r^2 = 11310 \text{ mm}^2$

Průřezový modul:  $W_y = \frac{\pi d^3}{32} = 1,70 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$

$$W_z = \frac{\pi d^3}{32} = 1,70 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

Moment setrvačnosti:  $I_y = \frac{1}{4} \pi r^4 = 1,02 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

$$I_z = \frac{1}{4} \pi r^4 = 1,02 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Poloměr setrvačnosti:  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 30 \text{ mm}$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 30 \text{ mm}$$

**MSÚ – Kombinace vzpěrného tlaku s ohybem:**

*Vnitřní síly:*

Normálová síla:  $N_{Ed,max} = 21,27 \text{ kN}$  NC59

Ohybový moment:  $M_{Ed,y,přisl} = 0 \text{ kNm}$  NC59

Ohybový moment:  $M_{Ed,z,přisl} = 0,17 \text{ kNm}$  NC59

Návrhová napětí dle ( 5.4.15), ( 5.4.20) a ( 5.4.21):

Návrhové napětí v tlaku // s vlákny: 
$$\sigma_{c,0,d} = \frac{21,27}{11310 \cdot 10^{-3}} = 1,88 \text{ MPa}$$

Návrhové napětí v ohybu k ose y: 
$$\sigma_{m,y,d} = \frac{0}{1,70 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 0 \text{ MPa}$$

Návrhové napětí v ohybu k ose z: 
$$\sigma_{m,z,d} = \frac{0,17}{1,70 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 1 \text{ MPa}$$

Posouzení vzpěrné únosnosti v kombinaci s ohybem dle odst. 5.4.2.8:

Vzpěrná délka: 
$$L_{cr,z} = 3850 \text{ mm}$$

Štíhlostní poměr: 
$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{3850}{30} = 128,33$$

Poměrný štíhlostní poměr: 
$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{128,33}{\pi} \sqrt{\frac{23}{8000}} = 2,190$$

Součinitel  $k_z$ : 
$$k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5(1 + 0,2(2,190 - 0,3) + 2,190^2)$$

$$k_z = 3,088$$

Součinitel  $k_{cz}$ : 
$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{3,088 + \sqrt{3,088^2 - 2,190^2}} = 0,190$$

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.36):

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{1,88}{0,190 \cdot 12,38} + 0,7 \frac{0}{16,15} + \frac{1}{16,15} \leq 1$$

$$0,80 + 0 + 0,06 \leq 1$$

$$0,86 \leq 1$$

✓✓✓ VYHOVUJE

### MSÚ – Smyk:

Účinná plocha průřezu  $A_{ef}$ :  $k_{cr} = 0,67$  (RD)

$$b_{ef} = k_{cr} \cdot b = 0,67 \cdot 120 = 80,4 \text{ mm}$$

$$A_{ef} = \pi r^2 = \pi \cdot 40,2^2 = 5077 \text{ mm}^2$$

Vnitřní síly:

Smykové síly:  $V_{Ed,z,max} = 1,33 \text{ kN}$  NC79

$V_{Ed,y,přísl} = 0,01 \text{ kN}$  NC79

Návrhová napětí dle ( 5.4.17) :

$$\text{Návrhová napětí ve smyku: } \tau_{d,y} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed,y,přísl}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{0,01}{5077 \cdot 10^{-3}} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$\tau_{d,z} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed,z,max}}{A_{ef} \cdot 10^{-3}} = \frac{3}{2} \frac{11,33}{5077 \cdot 10^{-3}} = 0,39 \text{ MPa}$$

Posouzení ve smyku dle odst. 5.4.2.4:

Podmínka spolehlivosti dle ( 5.4.19):

$$\frac{\sqrt{\tau_{d,y}^2 + \tau_{d,z}^2}}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{0,00^2 + 0,39^2}}{2,15} \leq 1$$

$$0,18 \leq 1$$

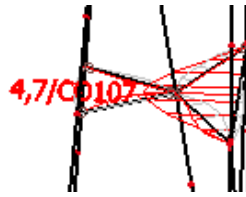
✓✓✓ VYHOVUJE

### MSP – PRŮHYB:

Nejnepříznivější kombinace pro vodorovný průhyb ztužujících prvků je CO107 (ZS1.1 + ZS2.1+ +ZS9.1). Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb ztužujících prvků je CO80 (ZS1.1 + ZS2.1+ ZS5.0,4 +ZS9.1).

### Vodorovný průhyb

Délka prvku:  $L = 4\,890 \text{ mm}$  (vyhoví i pro  $L = 2125 \text{ mm}$ )



### Ověření průhybů dle (5.4.1) až (5.4.10):

#### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 0 + 4,7 = 4,7 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu způsobeného dopravou<sup>9</sup>:

$$w_{inst,Q_1} = 4,7 \text{ mm} \leq w_{inst,Q,lim} = \frac{L}{400} = \frac{4890}{400} = 12,23 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 4,7 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{4890}{300} = 16,3 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0(1 + 2) = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 4,7(1 + 0,2) = 4,7 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} = 0 + 4,7 = 4,7 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 4,7 - 0 = 4,7 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 4,7 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{4890}{250} = 19,56 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Posouzení konečného průhybu:

$$w_{fin} = 4,7 \text{ mm} \leq w_{fin} = \frac{L}{150} = \frac{4890}{150} = 32,6 \text{ mm}$$

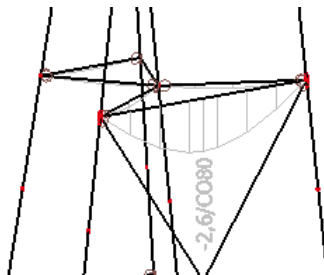
✓✓✓ VYHOVUJE

<sup>9</sup> V případě, že vyhoví okamžitý průhyb od proměnného zatížení sněhem, které je nejnepříznivější, vyhoví i průhyb od zatížení dopravou, který je příznivější.



### Svislý průhyb

Délka prvku:  $L = 4\,890\text{ mm}$  (vyhoví i pro  $L = 2125\text{ mm}$ )



### Ověření průhybů dle (5.4.1) až (5.4.10):

#### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} + w_{inst,Q_2} = 2,6 + 0 + 0 = 2,6\text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 2,6\text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{4890}{300} = 6,3\text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0\text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 2,6(1 + 2) = 8,4\text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} = 8,4 + 0 = 8,4\text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 8,4 - 0 = 8,4\text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 8,4\text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{4890}{250} = 19,56\text{ mm}$$

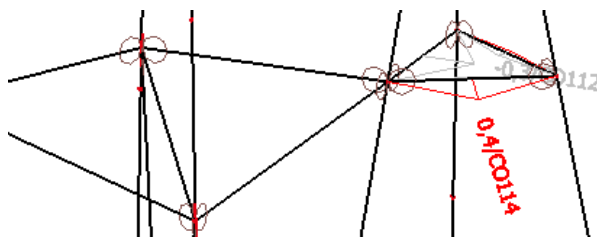
✓✓✓ VYHOVUJE

Dané průhyby vyhovují i pro prvky o délce 2125 mm. Proto byly v následujícím odstavci ještě ověřeny průhyby pro prvky o délce nižší než 2125 mm.

### Vodorovný průhyb

Nejnepříznivější kombinace pro vodorovný průhyb ztužujících prvků kratších 2125 mm je CO114 (ZS1.1 + ZS2.1+ +ZS9.1). Nejnepříznivější kombinace pro svislý průhyb ztužujících prvků je CO80 (ZS1.1 + ZS2.1+ ZS3.0,4 +ZS9.1).

Délka prvku:  $L = 1350 \text{ mm}$  (vyhoví i pro  $L = 850 \text{ mm}$  – nejkratší prvek)



### Ověření průhybů dle (5.4.1) až (5.4.10):

#### Okamžitý průhyb:

$$w_{inst,celk} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} = w_{inst,G} + w_{inst,Q_1} = 0 + 0,4 = 0,4 \text{ mm}$$

Posouzení okamžitého průhybu celkem:

$$w_{inst,celk} = 0,4 \text{ mm} \leq w_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{1350}{300} = 4,5 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Konečný průhyb:

Předepsané nadvýšení:

$$w_c = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G}(1 + k_{def}) = 0(1 + 2) = 0 \text{ mm}$$

$$w_{fin,Q_1} = w_{inst,Q_1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}) = 0,4(1 + 0,2) = 0,4 \text{ mm}$$

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q_1} = 0 + 0,4 = 0,4 \text{ mm}$$

$$w_{net,fin} = w_{fin} - w_c = 0,4 - 0 = 0,4 \text{ mm}$$

Posouzení čistého konečného průhybu:

$$w_{net,fin} = 0,4 \text{ mm} \leq w_{net,fin,lim} = \frac{L}{250} = \frac{1350}{250} = 5,4 \text{ mm}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Pozn.: Okamžitý svislý průhyb ztužujících prvků kratších než 2125 mm je nulový.

## 6.7 Návrh a posudek vybraných spojů

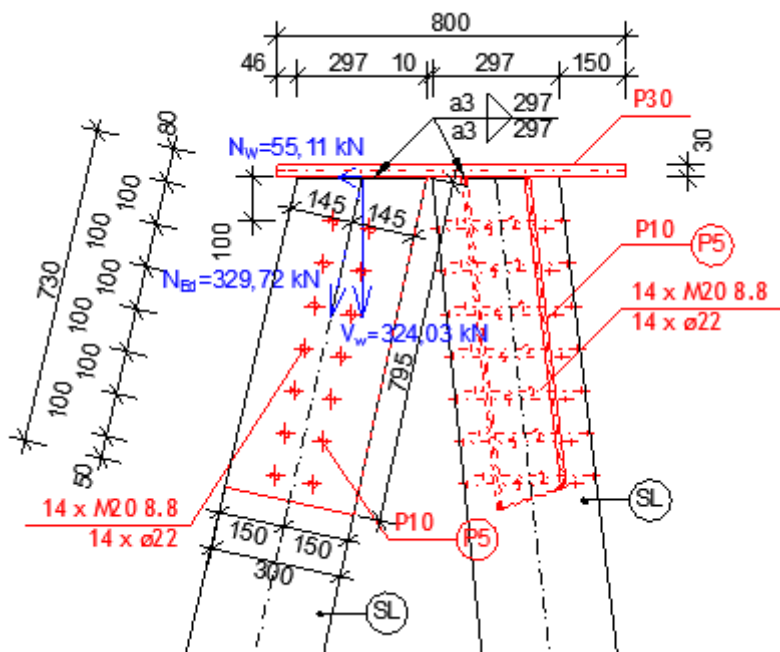
### 6.7.1 Detail A

Detail A je z hlediska návrhu a posouzení nejsložitějším detailem vyskytujícím se v konstrukci, neboť se v tomto místě stykují celkem deset prutů. Jedná se o spoj sloupů kruhového průřezu (3 ks), dolního pásu příhradoviny (1 ks), diagonál (4ks) a svislic (2ks).

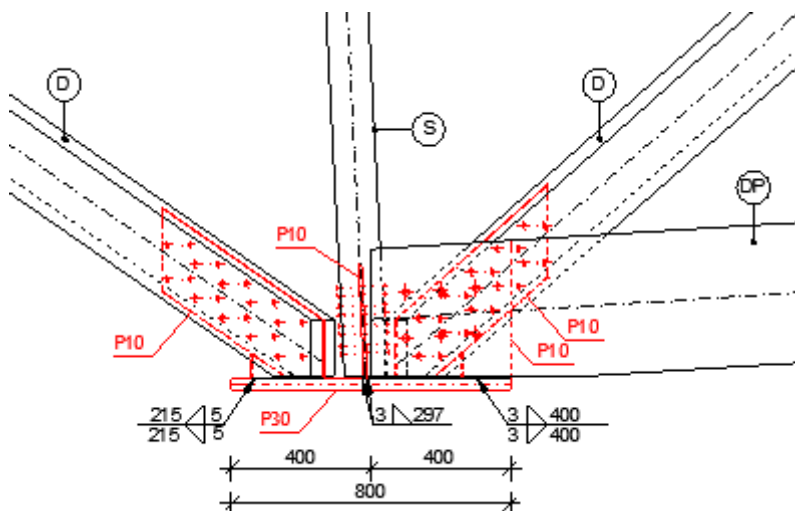
Umístění detailu:



### DETAIL A – ČÁST KOTVENÍ HLAV SLOUPŮ



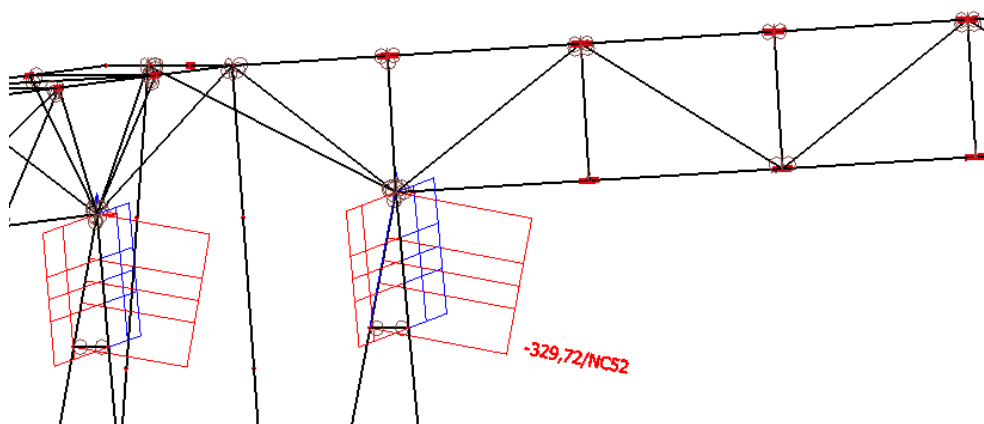
## DETAIL A – ČÁST KOTVENÍ PRVKŮ PŘÍHRADOVINY



### 6.7.1.1 Návrh spoje sloupů – DETAIL A

#### Vnitřní síly:

Spoj pro sloupky byly navrženy na maximální osovou sílu vyskytující se u hlavy sloupu v rámci celé konstrukce.



$$N_{Ed,max} = 329,72 \text{ kN}$$

Spoj je dimenzován jako dvojstřížný spoj ocel – dřevo a byly použity Johansenovy vzorce dle [5] pro ocelovou desku libovolné tloušťky jako střední prvek dvojstřížného spoje.

#### Návrh a posouzení spojovacích prostředků:

Návrh: **14 x M20 8.8 + 14 x matice M20 s podložkou**

Průměr šroubu:  $d = 20 \text{ mm}$

Plocha jádra šroubu:  $A_s = 245 \text{ mm}^2$

Účinný průměr:	$d_{ef} = 18,50 \text{ mm}$
Hustota dřeva:	$\rho_k = 380 \text{ kg.m}^{-3}$
Charakteristická pevnost v tahu:	$f_{u,k} = 800 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti:	$\gamma_M = 1,3$
Modifikační součinitel:	$k_{mod} = 0,7$
Minimální tloušťka podložky:	$t_p = 0,3 \cdot d = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ mm}$
Minimální průměr podložky:	$d_p = 3 \cdot d = 60 \text{ mm}$
Průměr otvoru v plechu:	$d_{op} = 22 \text{ mm}$

Charakteristická pevnost v otláčení ve dřevu:

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d_{ef})\rho_k = 0,082(1 - 0,01 \cdot 18,50)380 = 25,40 \text{ MPa}$$

Plastický moment únosnosti:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d_{ef}^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 18,50^2 = 472996,3 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho spojovacího prostředku pro jeden střih  $F_{v,Rk}$ :

$$\text{Únosnost na vytažení:} \quad F_{ax,Rk} = 0 \text{ kN}$$

$$\text{Tloušťka krajního dřevěného prvku:} \quad t_1 = 92,5 \text{ mm}$$

**Johansenovy vzorce:**

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d_{ef} \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d_{ef} t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d_{ef}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 43457,88 \text{ N} \\ 24850,67 \text{ N} \\ 34286,26 \text{ N} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 24,85 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho spojovacího prostředku:

$$\text{Počet střihů:} \quad n_s = 2$$

$$F_{v,Rd} = n_s \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 2 \frac{0,7 \cdot 24,85}{1,3} = 26,76 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost všech spojovacích prostředků:

$$\text{Počet svorníků:} \quad n = 14 \text{ ks}$$

$$F_{v,Rd} = n \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rd}}{\gamma_M} = 14 \frac{0,7 \cdot 26,76}{1,3} = 374,67 \text{ kN}$$

Posouzení únosnosti spoje:

$$N_{Ed} = 329,72 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 374,67 \text{ kN}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Minimální rozteče pro úhel mezi silou a směrem vláken  $0^\circ$ :

$$a_1 = (4 + |\cos \alpha|)d = (4 + |\cos 0^\circ|) \cdot 20 = 100 \text{ mm}$$

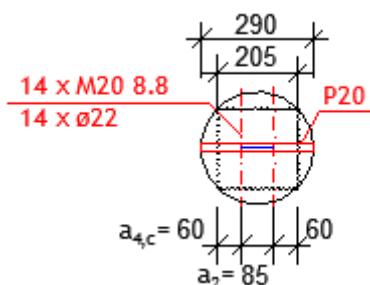
$$a_{4,c} = 3d = 3 \cdot 20 = 60 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4d = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mm}$$

$$a_{1,skut} = 100 \text{ mm}$$

$$a_{4,c,skut} = 60 \text{ mm}$$

$$a_{2,c,skut} = 85 \text{ mm}$$



✓✓✓ VYHOVUJE

### Návrh a posouzení ocelového plechu:

Tloušťka plechu:  $t = 10 \text{ mm}$

Šířka plechu:  $\check{s} = 297 \text{ mm}$

Průměr otvoru v ocelovém plechu:  $d = 22 \text{ mm}$

Oslabená plocha:  $A_{osl} = t \cdot \check{s} - 2 \cdot d \cdot t = 10 \cdot 297 - 2 \cdot 22 \cdot 10 = 2530 \text{ mm}^2$

Mez kluzu:  $f_{yd} = 235 \text{ MPa}$

Návrhová únosnost plechu v tahu:  $N_{t,Rd} = A_{osl} \cdot f_y = 2530 \cdot 235 = 1189,1 \text{ kN}$

Posouzení:  $N_{Ed} = 329,72 \text{ kN} \leq N_{t,Rd} = 594,55 \text{ kN}$

✓✓✓ VYHOVUJE

### Návrh a posouzení svarů:

Účinný rozměr svaru:  $a = 3 \text{ mm}$

Minimální délka svaru:  $L_{w,min} \geq 6 \cdot a \geq 18 \text{ mm}$

$$L_{w,min} \geq 30 \text{ mm}$$

✓✓✓ SPLNĚNO

Dlouhý svar:  $L_{w,min} \geq 150 \cdot a = 450 \text{ mm}$  (nejedná se o dlouhý svar)

Maximální osová síla:	$N = 329,72 \text{ kN}$
Svislá složka:	$V_w = 324,03 \text{ kN}$
Vodorovná složka:	$N_w = 55,11 \text{ kN}$
Skutečná délka svaru:	$L_w = 297 \text{ mm}$
Mez pevnosti svaru:	$f_u = 360 \text{ MPa}$
Korekční faktor (vliv rozdílů mezi H-M-H hypotézou a skutečností:	$\beta_w = 0,8$
Dílčí součinitel materiálu:	$\gamma_M = 1,25$

Smykové napětí rovnoběžně s osou svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_w}{2 \cdot A} = \frac{N_w}{2 \cdot L_w \cdot a} = \frac{55,11 \cdot 10^3}{2 \cdot 297 \cdot 3} = 30,93 \text{ MPa}$$

Náhradní napětí pod úhlem k ose svaru:

$$\sigma_w = \frac{V_w}{2 \cdot A} = \frac{V_w}{2 \cdot L_w \cdot a} = \frac{324,03 \cdot 10^3}{2 \cdot 297 \cdot 3} = 181,84 \text{ MPa}$$

Normálové napětí kolmé na nebezpečný průřez a smykové napětí kolmé o ose svaru:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{181,84}{\sqrt{2}} = 128,58 \text{ MPa}$$

Srovnávací napětí:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{128,58^2 + 3(128,58^2 + 30,93^2)} = 262,67 \text{ MPa}$$

Návrhová únosnost svaru:

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

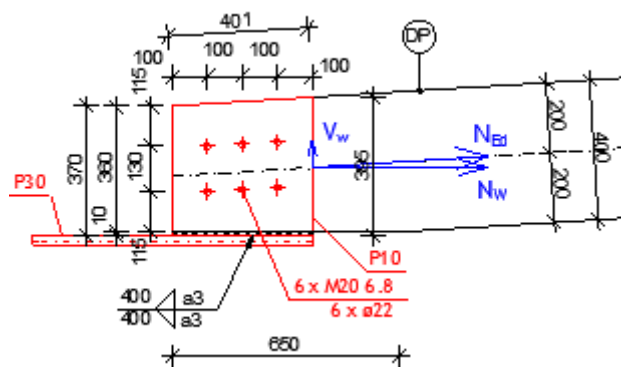
Posouzení:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 262,67 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = 360 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 96,43 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

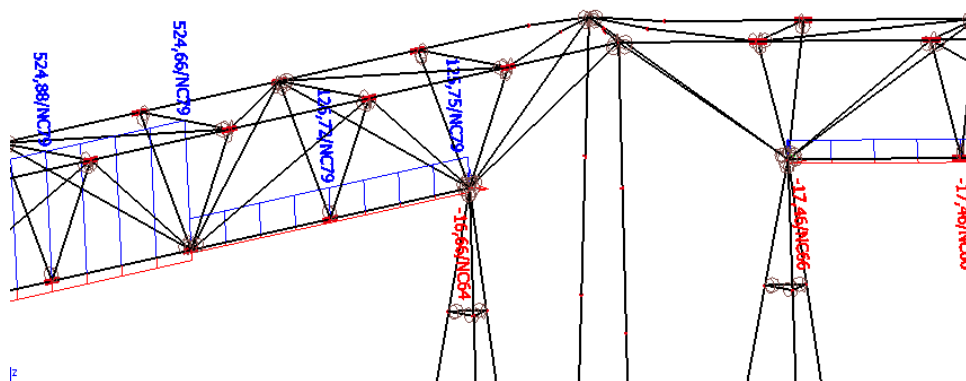
✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.7.1.2 Návrh spoje dolního pásu – DETAIL A



#### Vnitřní síly:

Spoj pro dolní pás byl navržen na maximální osovou sílu vyskytující se u konců dolního pásu v rámci celé konstrukce.



$$N_{Ed,max} = 125,75 \text{ kN}$$

Spoj je dimenzován jako dvojstřížný spoj ocel – dřevo a byly použity Johansenovy vzorce dle [5] pro ocelovou desku libovolné tloušťky jako střední prvek dvojstřížného spoje.

#### Návrh a posouzení spojovacích prostředků:

Návrh: **6 x M20 6.8 + 6 x matice M20 s podložkou**

Průměr šroubu:	$d = 20 \text{ mm}$
Plocha jádra šroubu:	$A_s = 245 \text{ mm}^2$
Účinný průměr:	$d_{ef} = 18,50 \text{ mm}$
Hustota dřeva:	$\rho_k = 350 \text{ kg.m}^{-3}$
Charakteristická pevnost v tahu:	$f_{u,k} = 600 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti:	$\gamma_M = 1,3$



Modifikační součinitel:  $k_{mod} = 0,7$   
 Minimální tloušťka podložky:  $t_p = 0,3 \cdot d = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ mm}$   
 Minimální průměr podložky:  $d_p = 3 \cdot d = 60 \text{ mm}$   
 Průměr otvoru v plechu:  $d_{op} = 22 \text{ mm}$

Charakteristická pevnost v otláčení ve dřevu:

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d_{ef})\rho_k = 0,082(1 - 0,01 \cdot 18,50)350 = 23,39 \text{ MPa}$$

Plastický moment únosnosti:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d_{ef}^{2,6} = 0,3 \cdot 600 \cdot 28,50^2 = 354747,2 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho spojovacího prostředku pro jeden střih  $F_{v,Rk}$ :

Únosnost na vytažení:  $F_{ax,Rk} = 0 \text{ kN}$

Tloušťka krajního dřevěného prvku:  $t_1 = 120 \text{ mm}$

**Johansenovy vzorce:**

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d_{ef} \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d_{ef} t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d_{ef}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 51926,91 \text{ N} \\ 25576,89 \text{ N} \\ 28496,59 \text{ N} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 25,58 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho spojovacího prostředku:

Počet střihů:  $n_s = 2$

$$F_{v,Rd} = n_s \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 2 \frac{0,7 \cdot 25,58}{1,3} = 27,54$$

Návrhová únosnost všech spojovacích prostředků:

Počet svorníků:  $n = 6 \text{ ks}$

$$F_{v,Rd} = n \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rd}}{\gamma_M} = 6 \frac{0,7 \cdot 27,54}{1,3} = 165,27 \text{ kN}$$

Posouzení únosnosti spoje:

$$N_{Ed} = 125,75 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 165,27 \text{ kN}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Minimální rozteče pro úhel mezi silou a směrem vláken  $0^\circ$ :

$$a_1 = (4 + |\cos \alpha|)d = (4 + |\cos 0^\circ|) \cdot 20 = 100 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 3d = 3 \cdot 20 = 60 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4d = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mm}$$

$$a_{1,skut} = 100 \text{ mm}$$

$$a_{4,c,skut} = 116 \text{ mm}$$

$$a_{2,skut} = 130 \text{ mm}$$

### Návrh a posouzení ocelového plechu:

Tloušťka plechu:  $t = 10 \text{ mm}$

Šířka plechu:  $\check{s} = 370 \text{ mm}$

Průměr otvoru v ocelovém plechu:  $d = 22 \text{ mm}$

Oslabená plocha:  $A_{osl} = t \cdot \check{s} - 2 \cdot d \cdot t = 10 \cdot 370 - 2 \cdot 22 \cdot 10 = 3260 \text{ mm}^2$

Mez kluzu:  $f_{yd} = 235 \text{ MPa}$

Návrhová únosnost plechu v tahu:  $N_{t,Rd} = A_{osl} \cdot f_y = 3260 \cdot 235 = 766,1 \text{ kN}$

Posouzení:  $N_{Ed} = 125,75 \text{ kN} \leq N_{t,Rd} = 766,1 \text{ kN}$

✓✓✓ VYHOVUJE

### Návrh a posouzení svarů:

Účinný rozměr svaru:  $a = 3 \text{ mm}$

Minimální délka svaru:  $L_{w,min} \geq 6 \cdot a \geq 18 \text{ mm}$

$$L_{w,min} \geq 30 \text{ mm}$$

✓✓✓ SPLNĚNO

Dlouhý svar:  $L_{w,min} \geq 150 \cdot a = 450 \text{ mm}$  (nejedná se o dlouhý svar)

Maximální osová síla:  $N = 125,75 \text{ kN}$

Excentricita síly:  $e = 195 \text{ mm}$

Skutečná délka svaru:  $L_w = 400 \text{ mm}$

Mez pevnosti svaru:  $f_u = 360 \text{ MPa}$

Korekční faktor (vliv rozdílů mezi  $\beta_w = 0,8$

H-M-H hypotézou a skutečností:

Dílčí součinitel materiálu:  $\gamma_M = 1,25$

Náhradní napětí pod úhlem k ose svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{N}{2 \cdot A} = \frac{N}{2 \cdot L_w \cdot a} = \frac{125,75 \cdot 10^3}{2 \cdot 400 \cdot 3} = 52,40 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w = \frac{N \cdot e}{2 \cdot W} = \frac{N \cdot e}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot a \cdot L_w^2} = \frac{125,75 \cdot 10^3 \cdot 195}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot 3 \cdot 400^2} = 153,26 \text{ MPa}$$

Normálové napětí kolmé na nebezpečný průřez a smykové napětí kolmé o ose svaru:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\tau_{\parallel} + \sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{52,40 + 153,26}{\sqrt{2}} = 290,84 \text{ MPa}$$

Srovnávací napětí:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{290,84^2 + 3(290,84^2 + 52,40^2)} = 290,84 \text{ MPa}$$

Návrhová únosnost svaru:

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

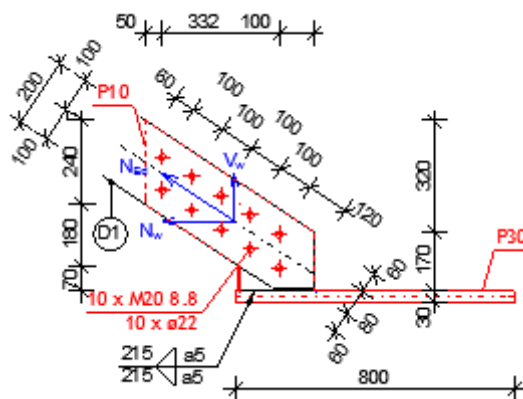
Posouzení:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 290,84 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = 360 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 290,84 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

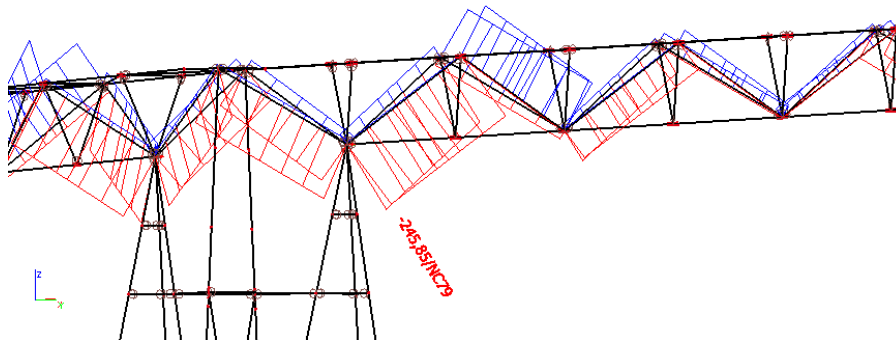
✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.7.1.3 Návrh spoje diagonál – DETAIL A



Vnitřní síly:

Spoj pro diagonály byl navržen na maximální osovou sílu vyskytující se v diagonálách v rámci celé konstrukce.



$$N_{Ed,max} = 245,85 \text{ kN}$$

Spoj je dimenzován jako dvojstřížný spoj ocel – dřevo a byly použity Johansenovy vzorce dle [5] pro ocelovou desku libovolné tloušťky jako střední prvek dvojstřížného spoje.

### Návrh a posouzení spojovacích prostředků:

Návrh: **10 x M20 8.8 + 10 x matice M20 s podložkou**

Průměr šroubu:	$d = 20 \text{ mm}$
Plocha jádra šroubu:	$A_s = 245 \text{ mm}^2$
Účinný průměr:	$d_{ef} = 18,50 \text{ mm}$
Hustota dřeva:	$\rho_k = 380 \text{ kg.m}^{-3}$
Charakteristická pevnost v tahu:	$f_{u,k} = 800 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti:	$\gamma_M = 1,3$
Modifikační součinitel:	$k_{mod} = 0,7$
Minimální tloušťka podložky:	$t_p = 0,3 \cdot d = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ mm}$
Minimální průměr podložky:	$d_p = 3 \cdot d = 60 \text{ mm}$
Průměr otvoru v plechu:	$d_{op} = 22 \text{ mm}$

Charakteristická pevnost v otláčení ve dřevu:

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d_{ef})\rho_k = 0,082(1 - 0,01 \cdot 18,50)380 = 25,40 \text{ MPa}$$

Plastický moment únosnosti:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d_{ef}^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 18,50^2 = 472886,3 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho spojovacího prostředku pro jeden střih  $F_{v,Rk}$ :

$$\text{Únosnost na vytažení: } F_{ax,Rk} = 0 \text{ kN}$$

$$\text{Tloušťka krajního dřevěného prvku: } t_1 = 95 \text{ mm}$$

**Johansenovy vzorce:**

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d_{ef} \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d_{ef} t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d_{ef}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 44632,42 \text{ N} \\ 25174,37 \text{ N} \\ 34286,26 \text{ N} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 25,17 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho spojovacího prostředku:

Počet stříhů:  $n_s = 2$

$$F_{v,Rd} = n_s \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 2 \frac{0,7 \cdot 25,17}{1,3} = 27,11 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost všech spojovacích prostředků:

Počet svorníků:  $n = 10 \text{ ks}$

$$F_{v,Rd} = n \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rd}}{\gamma_M} = 10 \frac{0,7 \cdot 27,11}{1,3} = 271,11 \text{ kN}$$

Posouzení únosnosti spoje:

$$N_{Ed} = 245,85 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 271,11 \text{ kN}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Minimální rozteče pro úhel mezi silou a směrem vláken  $0^\circ$ :

$$a_1 = (4 + |\cos \alpha|)d = (4 + |\cos 0^\circ|) \cdot 20 = 100 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 3d = 3 \cdot 20 = 60 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4d = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mm}$$

$$a_{1,skut} = 100 \text{ mm}$$

$$a_{4,c,skut} = 60 \text{ mm}$$

$$a_{2,skut} = 80 \text{ mm}$$

**Návrh a posouzení ocelového plechu:**

Tloušťka plechu:  $t = 10 \text{ mm}$

Šířka plechu:  $\check{s} = 240 \text{ mm}$

Průměr otvoru v ocelovém plechu:  $d = 22 \text{ mm}$

Oslabená plocha:  $A_{osl} = t \cdot \check{s} - d \cdot t = 10 \cdot 240 - 22 \cdot 10 = 1960 \text{ mm}^2$

Mez kluzu:  $f_{yd} = 235 \text{ MPa}$

Návrhová únosnost plechu v tahu:  $N_{t,Rd} = A_{osl} \cdot f_y = 1960 \cdot 235 = 460,6 \text{ kN}$

Posouzení:  $N_{Ed} = 245,85 \text{ kN} \leq N_{t,Rd} = 460,6 \text{ kN}$

✓✓✓ VYHOVUJE

### Návrh a posouzení svarů:

Účinný rozměr svaru:  $a = 5 \text{ mm}$

Minimální délka svaru:  $L_{w,min} \geq 6 \cdot a \geq 30 \text{ mm}$

$$L_{w,min} \geq 30 \text{ mm}$$

✓✓✓ SPLNĚNO

Dlouhý svar:  $L_{w,min} \geq 150 \cdot a = 750 \text{ mm}$  (nejedná se o dlouhý svar)

Maximální osová síla:  $N = 245,85 \text{ kN}$

Svislá složka:  $V_w = 136 \text{ kN}$

Vodorovná složka:  $N_w = 205 \text{ kN}$

Skutečná délka svaru:  $L_w = 195 \text{ mm}$

Mez pevnosti svaru:  $f_u = 360 \text{ MPa}$

Korekční faktor (vliv rozdílů mezi  $\beta_w = 0,8$

H-M-H hypotézou a skutečností:

Dílčí součinitel materiálu:  $\gamma_M = 1,25$

Náhradní napětí pod úhlem k ose svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_w}{2 \cdot A} = \frac{N_w}{2 \cdot L_w \cdot a} = \frac{205 \cdot 10^3}{2 \cdot 195 \cdot 5} = 105,13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w = \frac{V_w}{2 \cdot A} = \frac{V_w}{2 \cdot a \cdot L_w} = \frac{136 \cdot 10^3}{2 \cdot 5 \cdot 195} = 69,74 \text{ MPa}$$

Normálové napětí kolmé na nebezpečný průřez a smykové napětí kolmé k ose svaru:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{69,74}{\sqrt{2}} = 123,65 \text{ MPa}$$

Srovnávací napětí:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{123,65^2 + 3(123,65^2 + 105,13^2)} = 307,11 \text{ MPa}$$

Návrhová únosnost svaru:

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

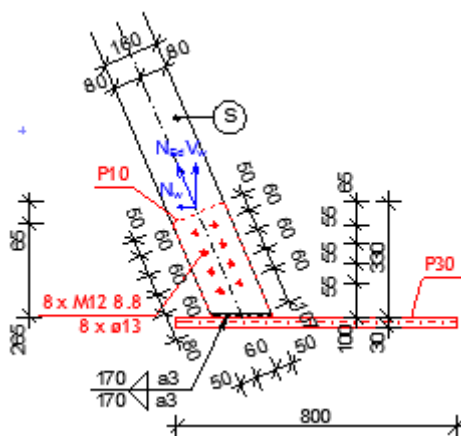
Posouzení:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 307,11 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = 360 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 123,65 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

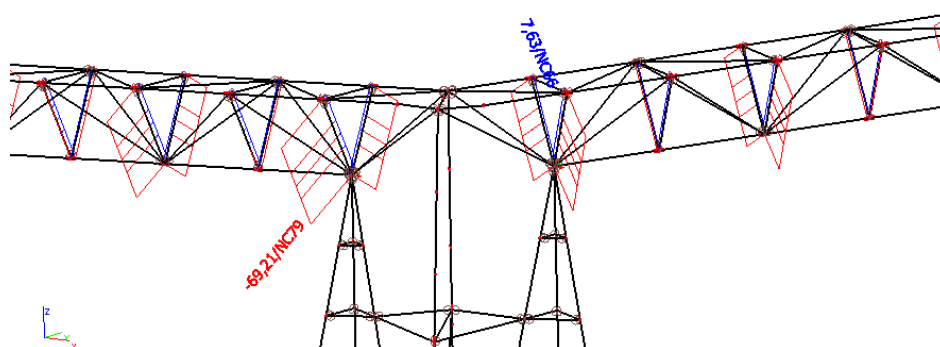
✓✓✓ VYHOVUJE

#### 6.7.1.4 Návrh spoje svislic – DETAIL A



Vnitřní síly:

Spoj pro svislice byl navržen na maximální osovou sílu vyskytující se ve svislicích v rámci celé konstrukce.



$$N_{Ed,max} = 69,21 \text{ kN}$$

Spoj je dimenzován jako dvojstřížný spoj ocel – dřevo a byly použity Johansenovy vzorce dle [5] pro ocelovou desku libovolné tloušťky jako střední prvek dvojstřížného spoje.

### Návrh a posouzení spojovacích prostředků:

Návrh: **8 x M12 8.8 + 8 x matice M12 s podložkou**

Průměr šroubu:	$d = 12 \text{ mm}$
Plocha jádra šroubu:	$A_s = 84,3 \text{ mm}^2$
Účinný průměr:	$d_{ef} = 10,5 \text{ mm}$
Hustota dřeva:	$\rho_k = 350 \text{ kg.m}^{-3}$
Charakteristická pevnost v tahu:	$f_{u,k} = 800 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti:	$\gamma_M = 1,3$
Modifikační součinitel:	$k_{mod} = 0,7$
Minimální tloušťka podložky:	$t_p = 0,3 \cdot d = 0,3 \cdot 12 = 3,6 \text{ mm}$
Minimální průměr podložky:	$d_p = 3 \cdot d = 36 \text{ mm}$
Průměr otvoru v plechu:	$d_{op} = 13 \text{ mm}$

Charakteristická pevnost v otláčení ve dřevu:

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d_{ef})\rho_k = 0,082(1 - 0,01 \cdot 10,5)350 = 25,69 \text{ MPa}$$

Plastický moment únosnosti:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d_{ef}^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 10,5^{2,6} = 108468,4 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho spojovacího prostředku pro jeden stříh  $F_{v,Rk}$ :

Únosnost na vytažení:  $F_{ax,Rk} = 0 \text{ kN}$

Tloušťka krajního dřevěného prvku:  $t_1 = 55 \text{ mm}$

**Johansenovy vzorce:**

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d_{ef} \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d_{ef} t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d_{ef}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 14833,95 \text{ N} \\ 8769,26 \text{ N} \\ 12440,18 \text{ N} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 8,77 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho spojovacího prostředku:

Počet stříhů:  $n_s = 2$

$$F_{v,Rd} = n_s \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 2 \frac{0,7 \cdot 8,77}{1,3} = 9,44 \text{ kN}$$



Návrhová únosnost všech spojovacích prostředků:

Počet svorníků:  $n = 8$  ks

$$F_{v,Rd} = n \frac{k_{mod} \cdot F_{v,RD}}{\gamma_M} = 8 \frac{0,7 \cdot 9,44}{1,3} = 75,55 \text{ kN}$$

Posouzení únosnosti spoje:

$$N_{Ed} = 69,21 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 75,55 \text{ kN}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Minimální rozteče pro úhel mezi silou a směrem vláken  $0^\circ$ :

$$a_1 = (4 + |\cos \alpha|)d = (4 + |\cos 0^\circ|) \cdot 12 = 60 \text{ mm}$$

$$a_{4,c} = 3d = 3 \cdot 12 = 36 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4d = 4 \cdot 12 = 80 \text{ mm}$$

$$a_{1,skut} = 60 \text{ mm}$$

$$a_{4,c,skut} = 50 \text{ mm}$$

$$a_{2,skut} = 60 \text{ mm}$$

#### Návrh a posouzení ocelového plechu:

Tloušťka plechu:  $t = 6 \text{ mm}$

Šířka plechu:  $\check{s} = 160 \text{ mm}$

Průměr otvoru v ocelovém plechu:  $d = 13 \text{ mm}$

Oslabená plocha:  $A_{osl} = t \cdot \check{s} - 2 \cdot d \cdot t = 10 \cdot 160 - 2 \cdot 13 \cdot 10 = 804 \text{ mm}^2$

Mez kluzu:  $f_{yd} = 235 \text{ MPa}$

Návrhová únosnost plechu v tahu:  $N_{t,Rd} = A_{osl} \cdot f_y = 804 \cdot 235 = 188,94 \text{ kN}$

Posouzení:  $N_{Ed} = 69,21 \text{ kN} \leq N_{t,Rd} = 188,94 \text{ kN}$

✓✓✓ VYHOVUJE

#### Návrh a posouzení svarů:

Účinný rozměr svaru:  $a = 3 \text{ mm}$

Minimální délka svaru:  $L_{w,min} \geq 6 \cdot a \geq 18 \text{ mm}$

$$L_{w,min} \geq 30 \text{ mm}$$

✓✓✓ SPLNĚNO

Dlouhý svar:  $L_{w,min} \geq 150 \cdot a = 450 \text{ mm}$  (nejedná se o dlouhý svar)

Maximální osová síla:  $N = 69,21 \text{ kN}$

Svislá složka:  $V_w = 63,7 \text{ kN}$

Vodorovná složka:  $N_w = 27 \text{ kN}$

Skutečná délka svaru:  $L_w = 170 \text{ mm}$

Mez pevnosti svaru:  $f_u = 360 \text{ MPa}$

Korekční faktor (vliv rozdílů mezi  $\beta_w = 0,8$

H-M-H hypotézou a skutečností:

Dílčí součinitel materiálu:  $\gamma_M = 1,25$

Náhradní napětí pod úhlem k ose svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_w}{2 \cdot A} = \frac{N_w}{2 \cdot L_w \cdot a} = \frac{27 \cdot 10^3}{2 \cdot 170 \cdot 3} = 26,47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w = \frac{V_w}{2 \cdot A} = \frac{V_w}{2 \cdot L_w \cdot a} = \frac{63,7 \cdot 10^3}{2 \cdot 170 \cdot 5} = 62,45 \text{ MPa}$$

Normálové napětí kolmé na nebezpečný průřez a smykové napětí kolmé k ose svaru:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{62,45}{\sqrt{2}} = 62,88 \text{ MPa}$$

Srovnávací napětí:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{62,88^2 + 3(62,88^2 + 26,47^2)} = 133,85 \text{ MPa}$$

Návrhová únosnost svaru:

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

Posouzení:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 133,85 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = 360 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 62,88 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 360 \text{ MPa}$$

## 6.7.2 Detail B

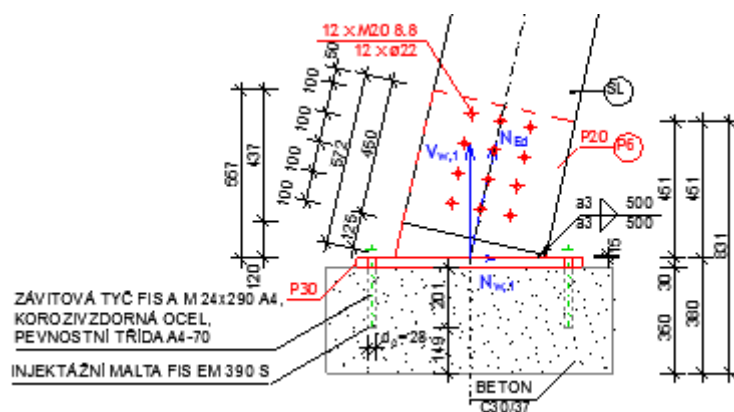
Detail B se zabývá kotvením sloupu ke kotevní desce, která je pak kotvena do betonového podkladu pomocí injektážního systému fischer FIS EM s injektážní maltou FIS EM 390 S a závitovými tyčemi FIS A M 24x2960 A4 z korozivzdorné oceli pevnostní třídy A4-70. Výpočet kotevního systému byl proveden pomocí programu Fixperience 1.17.0.4268. Výstupy z programu jsou součástí příloh. Pro spoj kruhového sloupu s vloženým ocelovým

plechem byly užity Johansenovy vzorce dle [5] pro ocelovou desku libovolné tloušťky jako střední prvek dvojstřížného spoje.

Umístění detailu:

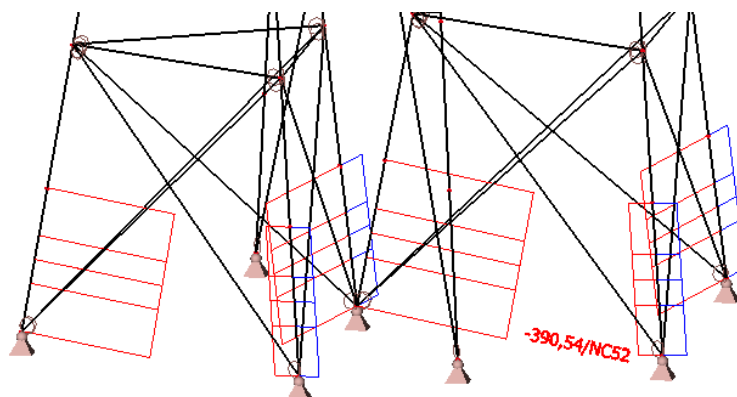


#### 6.7.2.1 Návrh kotvení sloupů – DETAIL B

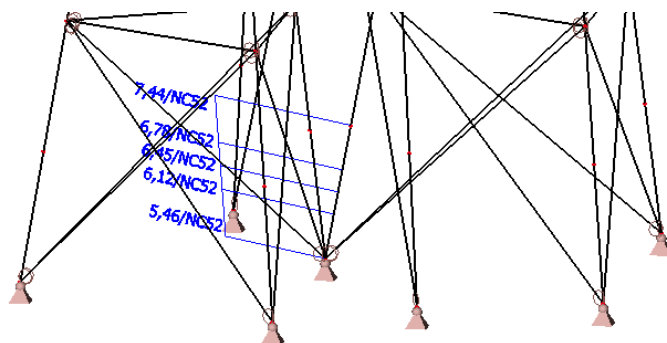


Vnitřní síly:

Kotvení sloupu s vloženým ocelovým plechem byly navrženy na maximální normálovou sílu vyskytující se v patě sloupy v rámci celé konstrukce a příslušnou posouvající sílu  $V_z$ .



$$N_{Ed,max} = 390,54 \text{ kN}$$



$$V_{Ed,přisl} = 5,46 \text{ kN}$$

$$Výslednice: R = \sqrt{N_{Ed,max}^2 + V_{z,Ed,přisl}^2} = 390,58 \text{ kN}$$

### Návrh a posouzení spojovacích prostředků:

Návrh: **12 x M20 8.8 + 12 x matice M20 s podložkou**

Průměr šroubu:	$d = 20 \text{ mm}$
Plocha jádra šroubu:	$A_s = 245 \text{ mm}^2$
Účinný průměr:	$d_{ef} = 18,50 \text{ mm}$
Hustota dřeva:	$\rho_k = 380 \text{ kg.m}^{-3}$
Charakteristická pevnost v tahu:	$f_{u,k} = 800 \text{ MPa}$
Součinitel spolehlivosti:	$\gamma_M = 1,3$
Modifikační součinitel:	$k_{mod} = 0,7$
Minimální tloušťka podložky:	$t_p = 0,3 \cdot d = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ mm}$
Minimální průměr podložky:	$d_p = 3 \cdot d = 60 \text{ mm}$
Průměr otvoru v plechu:	$d_{op} = 22 \text{ mm}$

Charakteristická pevnost v otláčení ve dřevu:

$$f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d_{ef})\rho_k = 0,082(1 - 0,01 \cdot 18,50)380 = 25,40 \text{ MPa}$$

Plastický moment únosnosti:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d_{ef}^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \cdot 18,50^2 = 472996,3 \text{ Nmm}$$

Charakteristická únosnost jednoho spojovacího prostředku pro jeden stříh  $F_{v,Rk}$ :

$$\text{Únosnost na vytažení: } F_{ax,Rk} = 0 \text{ kN}$$

$$\text{Tloušťka krajního dřevěného prvku: } t_1 = 160 \text{ mm}$$

**Johansenovy vzorce:**

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d_{ef} \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d_{ef} t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d_{ef}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 75170,38 \text{ N} \\ 35238,2 \text{ N} \\ 34286,26 \text{ N} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk} = 34,29 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho spojovacího prostředku:

Počet stříhů:  $n_s = 2$

$$F_{v,Rd} = n_s \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 2 \frac{0,7 \cdot 34,29}{1,3} = 36,92 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost všech spojovacích prostředků:

Počet svorníků:  $n = 12 \text{ ks}$

$$F_{v,Rd} = n \cdot n_s \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 12 \cdot 2 \cdot \frac{0,7 \cdot 34,29}{1,3} = 443,08 \text{ kN}$$

Posouzení únosnosti spoje:

$$N_{Ed} = 390,58 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 443,08 \text{ kN}$$

✓✓✓ VYHOVUJE

Minimální rozteče pro úhel mezi silou a směrem vláken  $0,8^\circ$  (úhel zanedbán)  $\rightarrow 0^\circ$ :

$$a_1 = (4 + |\cos \alpha|)d = (4 + |\cos 0^\circ|) \cdot 20 = 100 \text{ mm}$$

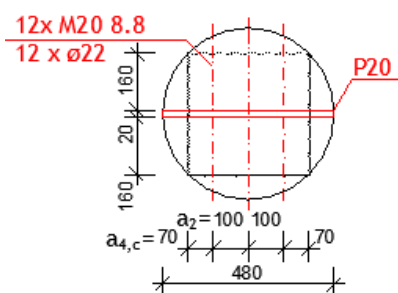
$$a_{4,c} = 3d = 3 \cdot 20 = 60 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4d = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mm}$$

$$a_{1,skut} = 100 \text{ mm}$$

$$a_{4,c,skut} = 70 \text{ mm}$$

$$a_{2,c,skut} = 100 \text{ mm}$$



### Návrh a posouzení ocelového plechu:

Ploušťka plechu:	$t = 20 \text{ mm}$
Šířka plechu:	$\bar{s} = 480 \text{ mm}$
Průměr otvoru v ocelovém plechu:	$d = 22 \text{ mm}$
Oslabená plocha:	$A_{osl} = t \cdot \bar{s} - 2 \cdot d \cdot t = 20 \cdot 480 - 2 \cdot 22 \cdot 20 = 8280 \text{ mm}^2$
Mez kluzu:	$f_{yd} = 235 \text{ MPa}$
Návrhová únosnost plechu v tahu:	$N_{t,Rd} = A_{osl} \cdot f_y = 8280 \cdot 235 = 1945,8 \text{ kN}$
Posouzení:	$N_{Ed} = 390,58 \text{ kN} \leq N_{t,Rd} = 1945,8 \text{ kN}$

✓✓✓ VYHOVUJE

### Návrh a posouzení svarů:

Účinný rozměr svaru:	$a = 3 \text{ mm}$
Minimální délka svaru:	$L_{w,min} \geq 6 \cdot a \geq 18 \text{ mm}$
	$L_{w,min} \geq 30 \text{ mm}$

✓✓✓ SPLNĚNO

Dlouhý svar:	$L_{w,min} \geq 150 \cdot a = 450 \text{ mm}$ (jedná se o dlouhý svar)
Maximální osová síla:	$N_{max} = 390,54 \text{ kN}$
Příslušná smyková síla:	$V_{Z,Ed,přisl} = 5,46 \text{ kN}$
Svislá složka posouvající síly:	$V_{w,1} = 1,22 \text{ kN}$
Vodorovná složka posouvající síly:	$N_{w,1} = 5,321 \text{ kN}$
Svislá složka osově síly:	$V_{w,2} = 381 \text{ kN}$
Vodorovná složka osově síly:	$N_{w,2} = 85 \text{ kN}$
Skutečná délka svaru:	$L_w = 500 \text{ mm}$
Mez pevnosti svaru:	$f_u = 360 \text{ MPa}$
Svislá složka sil celkem:	$V_{w,celk} = 382,22 \text{ kN}$
Vodorovná složka sil celkem:	$N_{w,celk} = 90,321 \text{ kN}$
Korekční faktor (vliv rozdílů mezi H-M-H hypotézou a skutečností:	$\beta_w = 0,8$
Dílčí součinitel materiálu:	$\gamma_M = 1,25$

Únosnost dlouhého svaru je nutno redukovat součinitelem  $\beta_{Lw}$ , zohledňující nerovnoměrné rozdělení napětí podél svaru

Součinitel  $\beta_{Lw}$ :

$$\beta_{Lw} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_j}{150 \cdot a} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot 500}{150 \cdot 3} = 0,98$$

Smykové napětí rovnoběžně s osou svaru:

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{w,celk}}{2 \cdot A} = \frac{N_{w,celk}}{2 \cdot L_w \cdot a} = \frac{90,321 \cdot 10^3}{2 \cdot 500 \cdot 3} = 30,11 \text{ MPa}$$

Náhradní napětí pod úhlem k ose svaru:

$$\sigma_w = \frac{V_{w,celk}}{2 \cdot A} = \frac{V_{w,celk}}{2 \cdot L_w \cdot a} = \frac{382,22 \cdot 10^3}{2 \cdot 500 \cdot 3} = 127,41 \text{ MPa}$$

Normálové napětí kolmé na nebezpečný průřez a smykové napětí kolmé o ose svaru:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{127,41}{\sqrt{2}} = 90,09 \text{ MPa}$$

Srovnávací napětí:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{90,09^2 + 3(90,09^2 + 30,11^2)} = 187,58 \text{ MPa}$$

Návrhová únosnost svaru:

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \beta_{Lw} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} \cdot 0,98 = 352 \text{ MPa}$$

Posouzení:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 187,58 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = 352 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 90,09 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{360}{0,8 \cdot 1,25} = 352 \text{ MPa}$$

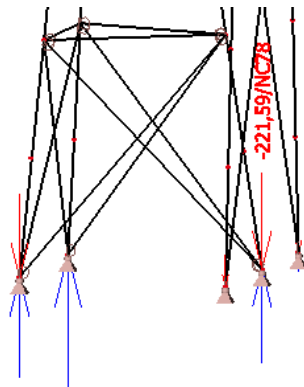
✓✓✓ VYHOVUJE

### 6.7.2.2 Návrh kotevní desky a kotev

Návrh byl proveden pomocí systému fischer FIS EM v programu Fixperience 1.17.0.4268. Výstupy z programu jsou součástí příloh. Pro výpočet byly zjištěny reakce  $R_{z,max}$ ,  $R_{x,přisl}$  a  $R_{y,přisl}$ , které vyvolaly maximální účinky.

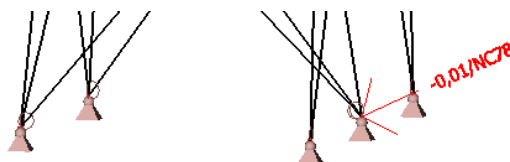
Maximální reakce  $R_z$  způsobující tahové namáhání kotev:

$$R_z = -221,59 \text{ kN}$$



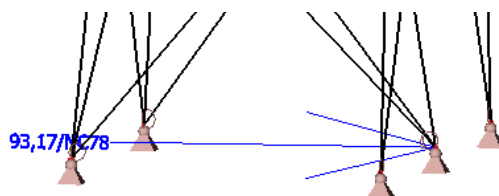
Maximální reakce  $R_y$ :

$$R_y = -0,01 \text{ kN}$$



Maximální reakce  $R_x$ :

$$R_x = -93,17 \text{ kN}$$



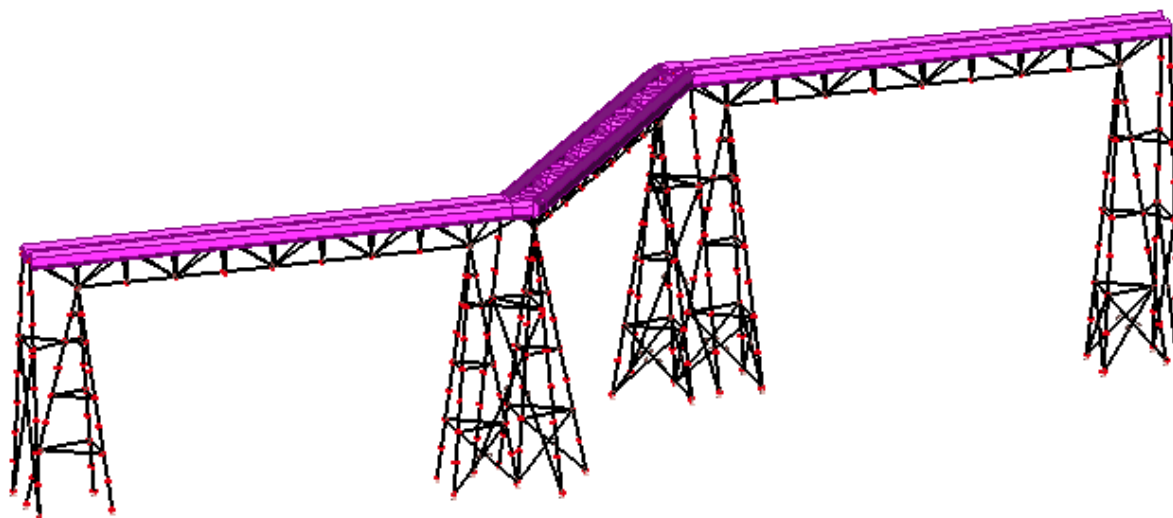
Síly byly zadány do již zmiňovaného výpočetního programu, který pak navrhl různé druhy kotevních systémů, vyhovující příslušnému zatížení a geometrii. Byl vybrán injektážní systém fischer FIS EM s injektážní maltou FIS EM 390 S a závitovými tyčemi FIS AM 24 x 290 A4 z korozi-vzdorné oceli pevností třídy A4 -70. Kotevní hloubka činí 201 mm. Program posoudil únosnost v tahu (selhání ocele, vytažení kotvy/selhání betonu, selhání betonu), únosnost ve smyku (selhání ocele bez ramene síly, selhání betonu na opačné straně zatížení) a únosnost na kombinaci tahu a smyku. Program rovněž navrhl minimální nutnou tloušťku kotevní ocelové desky, která byla stanovena na 30 mm z materiálu třídy S355.



## 6.8 Modální analýza

V rámci diplomové práce byla provedena modální analýza. Cílem bylo zjistit první vlastní frekvence a tvary kmitání, a zda je nutné ověřit kritéria pohody chodců. Ty se mají dle [9] ověřit v případech, kdy základní frekvence nosné konstrukce mostu je menší než 5 Hz pro svislé kmitání lávky, 2,5 Hz pro vodorovné a kroutové kmitání. Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání konstrukce.

Modální analýza byla provedena programem Scia Engineer 2014 pro kombinaci hmot vygenerovaných ze zatěžovacího stavu pro vlastní tíhu a ze zatěžovacího stavu pro stálé zatížení od tíhy mostovky a zábradlí. Hmoty od ZS pro vlastní tíhu Scia Engineer negeneruje. Model s vygenerovanými hmotami pro ZS stálé je na obr. č. 73. Výsledky jsou patrné z tab. č.21.



Obr. č. 73: Model s vygenerovanými hmotami od stálého zatížení (mostovka + zábradlí)

Modální analýza dle odst. 5.4.3:

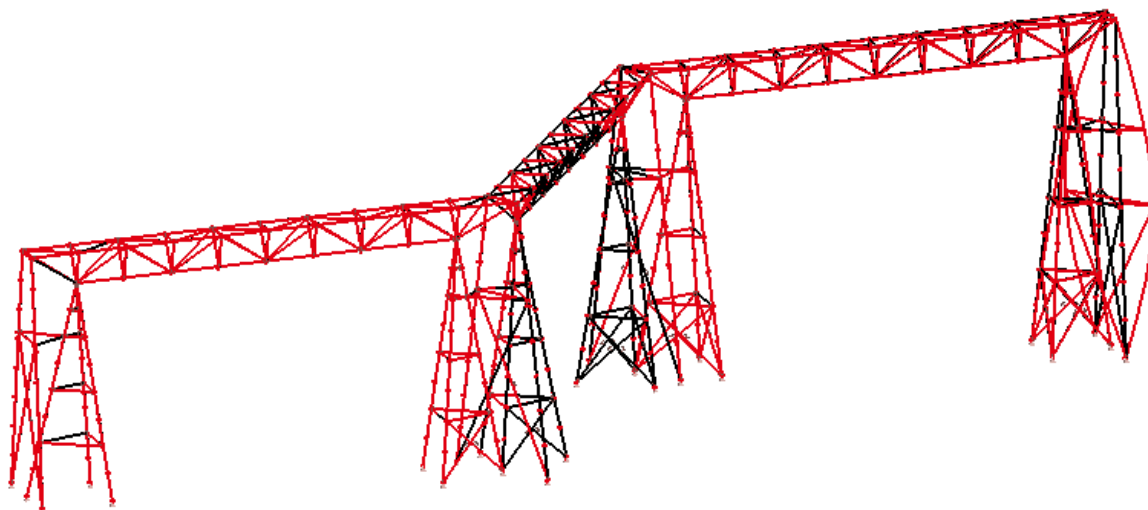
POPIS TVARU KMITÁNÍ	POŘADÍ VLASTNÍHO TVARU	FREKVENCE (SCIA ENGINEER) [Hz]	MINIMÁLNÍ FREKVENCE [Hz]		OVĚŘENÍ POHODY CHODCŮ
Vodorovné +torzní	1.	4,02	<	2,5	Není nutné
Svislé	39.	13,27	>	5	Není nutné

Tab.č.21: Výsledky modální analýzy řešené části konstrukce

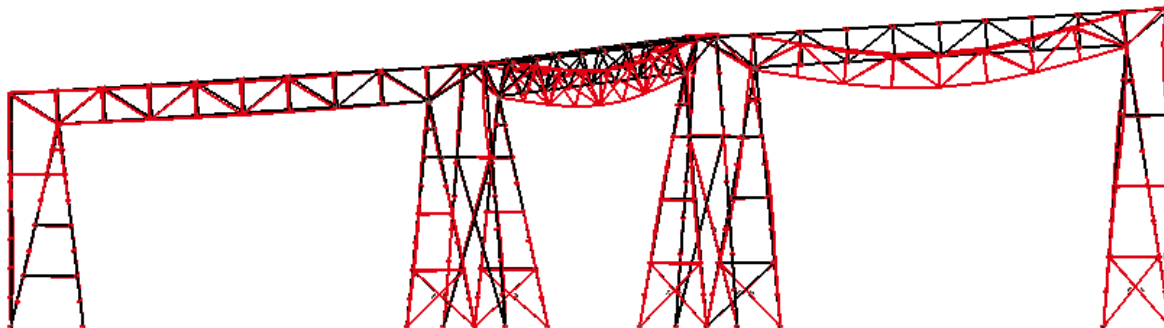
Z výsledků je patrné že frekvence splňují podmínky normy [9] a není nutné dále ověřovat kritéria pohody chodců.

#### Tvary vlastního kmitání:

- vodorovné + torzní kmitání (4,02 Hz) – 1. vlastní tvar



- svislé kmitání (13,27 Hz) – 39. vlastní tvar



## 7 Závěr

Tématem diplomové práce se stala konstrukce lávky v korunách stromů. Stezka korunami stromů je jedním z nejnavštěvovanějších turistických cílů v ČR i ve světě. V České Republice v současné době roste již druhá takováto turistická „atrakce“. Cílem této práce se stal návrh dřevěné lávky stezky korunami stromů pro rozpětí téměř 28 m. Lokalizace stezky se plánuje v horské oblasti Beskyd.

V úvodní části se diplomová práce zabývá dřevem jako konstrukčním materiálem, protože znalost stavby dřeva, jeho fyzikálních a mechanických vlastností, všech výhod i nevýhod jsou pro projektanta nezbytnou součástí. Shrnutí vývoje dřevěných lávek a rozdělení konstrukčních systémů je námětem dalších kapitol.

Pro volbu vhodného konstrukčního systému pro lávku o rozpětí 27,9 m bylo vzato v úvahu několik variant řešení. Jednotlivé varianty byly orientačně posouzeny na účinky vnitřních sil, které vyvolalo identické zatížení s identickým umístěním na konstrukci. Rozpětí všech variant bylo rovněž totožné. Účelem pak bylo navrhnout prvky jednotlivých systémů na maximální možné využití. Tak došlo k maximální možné redukci průřezů. Byly provedeny také modální analýzy pro zjištění dynamických vlastností konstrukcí. Sledována byla hmotnost a tuhost konstrukce, jejich vzájemný poměr a vlastní frekvence. Na základě výsledků byla vybrána vhodná varianta dle adekvátních důvodů, která byla dále podrobněji posuzována na účinky od zatížení dle evropských norem. V průběhu variantní analýzy jsem se naučila efektivně pracovat v programu Scia Engineer, přičemž jsem si vyzkoušela i mnoho dosud nepoznaných funkcí, např. tvorbu nelineárních kombinací, zadávat nelinearity na prutu (lano, vyloučení tahu či tlaku) pro nelineární výpočet, řešit zobecněný problém vlastních hodnot atd.

V další fázi se práce zabývá samotným výpočtem zatížení pro mosty, návrhem a posouzením jednotlivých nosných prvků, včetně mostin a zábradlí a posouzením vybraných detailů. I v tomto případě jsem objevila v programu Scia Engineer pro mě dosud neznámou funkcionalitu s názvem „návrh mostů → kombinace“, pomocí níž se vytvořily všechny potřebné kombinace určené pro lávky s příslušnými kombinačními součiniteli. Vyzkoušela jsem si také práci v programu Fixperience 1.17.0.4268 pro návrh systému kotvení sloupů.

Návrh konstrukčního řešení byl problematickým úkolem především z důvodu umístění konstrukce v horské oblasti s vysokou hodnotou zatížení sněhem i větrem a požadavkem vynést lávku do dostatečné výšky (19 m nad zemí) umožňující ničím nerušený výhled. V důsledku toho se v průběhu procesu hledání konstrukčního systému podporové konstrukce vyskytovaly nepříznivé vodorovné průhyby a velmi nízké hodnoty vlastních frekvencí. Řešení vyskytujících se problémů v průběhu návrhu určilo výslednou podobu podpůrné konstrukce.

Ukázalo se, že návrh dřevěné lávky pro rozpětí 28 m ve výšce 19 m nad zemí v horské oblasti není vůbec snadný, ale není nemožný. Konstrukce prostorové příhrady je nepochybně výhodnou pro takto velký rozpon. Avšak z důvodu znalosti konstrukčního systému již vybudované stezky v korunách stromu u Lipna, která je navržena jako spojitá konstrukce o třech šesti metrových polích uznávám, že preferovat návrh lávky na takto velké rozpětí musí mít své odůvodněné opodstatnění, v opačném případě, neexistuje-li opodstatněný důvod proč volit toto řešení, může být konstrukce v konečném důsledku neekonomická a to z důvodu složitější materiálově náročnější podporové konstrukce a vyšších nároků na provedení a přesnost.

## **Poděkování**

Na závěr bych ráda poděkovala všem osobnostem, jejichž rady mi ve značné míře pomohly při tvorbě této práce.

Děkuji vedoucímu práce, panu Ing. Romanu Fojtíkovi, Ph.D, za spolupráci, za čas strávený konzultacemi, za trpělivost, nespočet cenných odborných rad a přátelské jednání.

Děkuji také pedagogickému sboru VŠB – TUO za předané znalosti v průběhu studia.

Děkuji svým spolužákům za poskytnuté rady, především kamarádce Ing. Janě Rumlové.

Děkuji také svým vzácným rodičům a příteli za podporu během celého studia.

## 8 Seznam použité literatury:

### 8.1 Normy

- [1] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. ČNI, 2003.
- [2] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. ČNI, 2004.
- [3] ČSN EN 1991-1-3 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem. ČNI, 2005.
- [4] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem. ČNI, 2007.
- [5] ČSN EN 1995-1-1 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI, 2006.
- [6] ČSN EN 1995-2 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 2: Mosty, ČNI, 2006.
- [7] ČSN EN 1995-1-1 ZMĚNA A1 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii, státní zkušebnictví, Praha 2009.
- [8] ČSN EN 338 Konstrukční dřevo –Třídy pevnosti, ČNI, 2009
- [9] ČSN EN 1990 ZMĚNA A1: Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
- [10] ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou, ČNI, 2005
- [11] ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI, 2006

### 8.2 Literatura

- [12] Bílek, V.: Dřevostavby, Navrhování dřevěných vícepodlažních budov, ČVUT , 2006.
- [13] Rotter, T., Kuklík, P.: Ocelové a dřevěné konstrukce 11, ČVUT, 2004.

- [14] Novák, J. a kol.: Nauka o materiálech 10, Stavební materiály I, ČVUT, 1997.
- [15] Adámek, J., Novotný, B., Koukal, J.: Stavební materiály, CERM, s.r.o. Brno, 1996.
- [16] Svoboda, L. a kol.: Stavební hmoty, Jaga group, s.r.o., Bratislava, 2007.
- [17] Kafka, E. a kol.: Dřevařská příručka, SNTL Praha, 1989.
- [18] Požgaj, A. a kol.: Štruktúra a vlastnosti dreva, Príroda-Bratislava, 1993.
- [19] Šlezingerová, J., Gandelová, L.: Stavba dřeva, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2005.
- [20] Illston, J.M. et al.: Concrete, Timber and Metals – The Nature and Behaviour of Structural Materials, Van Nostrand Reinhold Co. , New York, 1979.
- [21] Both, L.G., Reece, P.O.: The Structural Use of Timber A Commentary on the BS – CP 112, Spon Ltd, London, 1967
- [22] A handbook of softwoods, Building Research Station, Garston, 1977
- [23] Koloušek, V.: Dynamika stavebních konstrukcí, 1. Obecná část, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1967
- [24] Kuklík, P.: Dřevěné konstrukce, Informační centrum ČKAIT, s.r.o., Praha, 2005
- [25] Kučera, V.: Architektura inženýrských staveb, Grada Publishing, a.s., Praha, 2009
- [26] Lokaj, A.: Materiály z přednášek Kovové a dřevěné konstrukce, 2013
- [27] Šmírák S., Hlavinková B.: Pružnost a plasticita I, příklady, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2000

### 8.3 Internetové zdroje

- [28] [http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon\\_vad/neprave\\_jadro.htm](http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_vad/neprave_jadro.htm)
- [29] [http://katedry.czu.cz/storage/3844\\_Studijni\\_mat\\_Nauka\\_o\\_d%C5%99ev%C4%9B\\_1.pdf](http://katedry.czu.cz/storage/3844_Studijni_mat_Nauka_o_d%C5%99ev%C4%9B_1.pdf)
- [30] [http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res\\_mikroskopicka\\_stavba\\_dreva/](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_mikroskopicka_stavba_dreva/)
- [31] <http://www.fine.cz/napoveda/finec/cs/vlastni-kmitani-01/>
- [32] <https://www.dlupal.com/blog/category/dlupal-pridavne-moduly-ostatni/>
- [33] [https://mech.fsv.cvut.cz/homeworks/student/DSK2/DSK2\\_01.pdf](https://mech.fsv.cvut.cz/homeworks/student/DSK2/DSK2_01.pdf)
- [34] <http://structurae.net/structures/kintai-bridge>
- [35] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Most\\_Kintai](https://cs.wikipedia.org/wiki/Most_Kintai)
- [36] <http://www.queens.cam.ac.uk/life-at-queens/about-the-college/college-facts/mathematical-bridge>
- [37] <http://www.chain.eu/?m3=32044>

- [38] <http://openbuildings.com/buildings/Pons-Sublicius-profile-1490#>
- [39] <http://www.romanpast.com/juliuscaesar1.html>
- [40] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Traj%C3%A1n%C5%AFv\\_most](https://cs.wikipedia.org/wiki/Traj%C3%A1n%C5%AFv_most)
- [41] <http://tripio.cz/evropa/svycarsko/centralni-svycarsko/lucern/atrakce/kaplovy-most>
- [42] <http://www.libri.cz/databaze/mosty/heslo.php?id=871>
- [43] <http://www.libri.cz/databaze/mosty/uvod.php>
- [44] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Padac%C3%AD\\_most](https://cs.wikipedia.org/wiki/Padac%C3%AD_most)
- [45] [http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CIHC1\\_179\\_Tampone%20G.pdf](http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CIHC1_179_Tampone%20G.pdf)
- [46] <http://www.pradelleitorri.it/cs/okruhy-benatsky/umeni-a-historie/bassano-del-grappa.html>
- [47] [http://www.pssletohrad.cz/files/vystupy/mostni\\_stavby.pdf](http://www.pssletohrad.cz/files/vystupy/mostni_stavby.pdf)
- [48] [http://www.wikiwand.com/de/Gedecte\\_Br%C3%BCcke](http://www.wikiwand.com/de/Gedecte_Br%C3%BCcke)
- [49] [http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook\\_1\\_CZ\\_final.pdf](http://fast10.vsb.cz/temtis/documents/handbook_1_CZ_final.pdf)
- [50] <http://www.structuremag.org/?p=1713>
- [51] [http://www.ticomtec.de/hbv/ref\\_bruecken\\_unido.htm](http://www.ticomtec.de/hbv/ref_bruecken_unido.htm)
- [52] <http://structurae.net/structures/wooden-bridge>
- [53] <http://www.awal.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=855>
- [54] <http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/11740-pozoruhodne-drevene-konstrukce-ze-severni-ameriky>
- [55] <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/dreveny-most-v-turisticke-oblasti-hrcava/>
- [56] [http://www.jizerky.eu/obr/jizerka\\_orle3.jpg](http://www.jizerky.eu/obr/jizerka_orle3.jpg)
- [57] <http://www.stavbykarlovarska.cz/cz/hlasovani/priroda-spojuje-svaty-linhart-141>
- [58] <http://www.nase-voda.cz/nove-lavky-na-sumave-zvysuji-turisticky-komfort/>
- [59] <http://www.stavbaroku.cz/printDetail.do?Dispatch=ShowDetail&siid=1169&coid=59>
- [60] <http://drevostavebniportal-popularizace.msdk.cz/files/drevene-lavky-a-mosty.pdf>
- [61] <http://www.pontika.cz/stavby/seznam/lavka>
- [62] <http://www.konstrukce-tesko.cz/reference/lavky-a-mosty/lavka-radlo?page=43>
- [63] [http://cestovani.idnes.cz/stezka-v-korunach-stromu-u-lipna-dox-/po-cesku.aspx?c=A120604\\_122003\\_igcechy\\_tom](http://cestovani.idnes.cz/stezka-v-korunach-stromu-u-lipna-dox-/po-cesku.aspx?c=A120604_122003_igcechy_tom)
- [64] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Stezka\\_korunami\\_strom%C5%AF](https://cs.wikipedia.org/wiki/Stezka_korunami_strom%C5%AF)
- [65] <https://www.facebook.com/stezkavoblacich/?fref=ts>
- [66] <http://www.dolnimorava.cz/stezka-v-oblacich/>



- [67] <http://www.neuschoenau.de/cs/nationalpark/baumwipfelpfad/baumwipfelpfad.html>
- [68] <http://www.studentpoint.cz/297-tipy-na-vylet/15035-prochazka-korunami-stromu-tentokrat-v-bavorsku#.VkMPircvdhE>
- [69] [https://www.dlupal.com/cz/download/examples/RSTAB\\_WIEHAG\\_Baumturm\\_Ruegen\\_CZ.pdf](https://www.dlupal.com/cz/download/examples/RSTAB_WIEHAG_Baumturm_Ruegen_CZ.pdf)
- [70] <https://www.capbridge.com/our-story/our-properties>
- [71] <https://www.capbridge.com/galleries>
- [72] [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)
- [73] <http://sgi.nahlizenidokn.cuzk.cz/marushka/default.aspx?themeid=3&&MarQueryId=6D2BCEB5&MarQParam0=768499&MarQParamCount=1&MarWindowName=Marushka>
- [74] [http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/tp1.16/tp1.16\\_kap1.pdf](http://www.profesis.cz/files//dokumpdf/tp1.16/tp1.16_kap1.pdf)
- [75] <http://www.snehovamapa.cz/>
- [76] [http://www.tension.cz/www/media/files/pdf-k-pripojeni\\_12/macalloy-system-konstrukcnich-tahel\\_57.pdf](http://www.tension.cz/www/media/files/pdf-k-pripojeni_12/macalloy-system-konstrukcnich-tahel_57.pdf)

## 8.4 Seznam použitých výpočetních a grafických programů

Scia Engineer 2014 (Studentská verze)

Archicad 17 (Výuková verze)

Fixperience 1.17.0.4268

Microsoft Office 2010

Artlantis Studio 4

Malování

## 8.5 Seznam obrázků

*Obr. č.1: Makroskopická struktura dřeva na jednotlivých řezech: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez; 1 – dřev, 2 - jádro, 3 - běl, 4 - kambium, 5 - lýko, 6 - kůra, 7 - letokruh, 8 – dřevné paprsky [19] ..... - 9 -*

*Obr. č. 2: Základní řezy dřevem: 1 – letokruh, 2 – jarní dřevo, 3 – letní dřevo, [19] ..... - 9 -*

*Obr. č.3: Rozdělení dřevin dle rozmístění a charakteru barevných zón: a – jednobarevný čelní řez bělových dřevin, b – dřeviny s bělí a zralým dřevem, c – jádrové dřeviny s bělí a jádrem, d – jádrové dřeviny se zónou vyžralého dřeva, e – tvary nepravých jader ..... - 12 -*

Obr. č.4: Prostorové znázornění anatomické stavby jehličnatého dřeva (borovice): 1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida. 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřeňový paprsek, 8 – příčná tracheida [30] .....	15 -
Obr. č.5: Prostorové znázornění anatomické stavby listnatého dřeva (jasan): 1 – letokruh, 2 – jarní céva, 3 – letní céva, 4 – libriformní vlákno, 5 – dřeňový paprsek, 6 – podélný parenchym. [30] .....	16 -
Obr. č. 6: Zakřivení řeziva: a)podélné plošné jednoduché, b) podélné plošné složené, c) podélné boční, d) příčné, e) šroubovitě [16] .....	17 -
Obr. č. 7: Tvarové změny prvků:a) způsobené sesycháním, b)způsobené kroucení při vysychání, 1-tangenciální, 2-radiální, 3-mezilehlé, 4-dřeňové [16] .....	18 -
Obr. č. 8: Most Pons Publicius přes Tiberu v Římě [38] .....	21 -
Obr. č. 9: Pontonový most vládců Xerxése [37] .....	21 -
Obr. č. 10: Caesarův most přes Rýn postavený za 10 dní [39].....	22 -
Obr. č. 11: Reliéf na Trajánově sloupu zobrazující most přes Dunaj[40].....	22 -
Obr. č. 12: Krytý most Kapallbrücke v Luzernu [41] .....	24 -
Obr. č. 13: Historický vs. soudobý most v Radošově [42] .....	24 -
Obr. č. 14: Zvedací most pevnosti Ponta de Badeira v Portugalsku [44] .....	25 -
Obr. č. 15: Goghův obraz Most v Arles [25] .....	25 -
Obr. č. 16: Příklady Palladiových návrhů dřevěných mostů [25],[45] .....	26 -
Obr. č. 17: Most Ponte degli Alpini v italském Bassano del Grappa [47] .....	26 -
Obr. č. 18: Most Kintai - Japonsko[34].....	27 -
Obr. č. 19 Detail mostu Kintai: spoje bez užití hřebíků[34] .....	28 -
Obr. č. 20 Matematický most z roku 1905 přes řeku Cam v Cambridge [36] .....	28 -
Obr. č. 21: Původní matematický most přes řeku Cam v Cambridge [36] .....	29 -
Obr. č. 22: Obraz mostu Giovanyho Canaletty[36].....	29 -
Obr. č. 23: Grubenmannův most v Schaffhausenu [45],[48].....	30 -
Obr. č. 24: Most přes Schuylkill ve Filadelfii [47] .....	30 -
Obr. č. 25: Most přes Delevar u Trentonu [50] .....	31 -
Obr. č. 26: Statické systémy lávek: a)trámové, b)vzpěradla, c)věšadla, d)rámové systémy, e)příhradové nosníky, f)obloukové systémy, g) zavěšené a visuté konstrukce, h) řetězové systémy, [26] .....	33 -
Obr. č. 27: Lávka v Purkersdorfu u Vídně [51] .....	34 -
Obr. č. 28: Trámový most přes řeku Drôme ve Francii [52] .....	34 -

Obr. č. 29: Dřevěná oblouková příhradová lávka přes řeku Placer River na Aljašce [54]	- 35 -
Obr. č. 30: Věšadlová lávka u Trojmezí v turistické oblasti Hřava v Beskydech [55]	..... - 36 -
Obr. č. 31: Karlovský most jako jizerskohorský turistický hraniční přechod [56]	..... - 37 -
Obr. č. 32: Pozorovací lávka v Lazeňských lesích u Karlových Varů [57]	..... - 37 -
Obr. č. 33: Oblouková lávka na Šumavě [58]	..... - 38 -
Obr. č. 34: Lávka přes I/E50 u motorestu Samota [60]	..... - 39 -
Obr. č. 35: Visutá lávka v Lokti v Zahradní ulici [61]	..... - 40 -
Obr. č. 36: Lávka Rádlo u Jablonce nad Nisou [62]	..... - 40 -
Obr. č. 37: Stezka korunami stromů u Lipna nad Vltavou v průběhu výstavby [63]	..... - 42 -
Obr. č. 38: Stezka v oblacích Dolní Morava [65]	..... - 43 -
Obr. č. 39: Stezka korunami stromů v Bavorském lese [67]	..... - 43 -
Obr. č. 40: Stezka korunami stromů na ostrově Rujána na Baltském moři [69], [68]	..... - 44 -
Obr. č. 41: Capilano Suspension Bridge Park ve Vancouveru v Kanadě [71]	..... - 44 -
Obr. č. 42: Lokalizace stezky v korunách stromů [72]	..... - 45 -
Obr. č. 43: Lokalizace stezky v korunách stromů [73]	..... - 46 -
Obr. č. 44: Princip Rayleighovy energetické metody [33]	..... - 57 -
Obr. č. 45: Označení hmotností $M_1$ a $M_2$	..... - 58 -
Obr. č. 46: Průhyb konstrukce od vlastní tíhy	..... - 59 -
Obr. č. 47: Součinitel participace tvaru pro variantu č. 3	..... - 59 -
Obr. č. 48: Hodnoty vodorovných průhybů od lineárně rostoucích sil	..... - 60 -
Obr. č. 49: Hlavní nosná konstrukce varianty č.1	..... - 61 -
Obr. č. 50: Numerický model varianty č. 1	..... - 62 -
Obr. č. 51: Hlavní nosná konstrukce varianty č.2	..... - 62 -
Obr. č. 52: Numerický model varianty č. 3	..... - 63 -
Obr. č. 53: Nosná konstrukce varianty č.3	..... - 63 -
Obr. č. 54: Numerický model varianty č. 3	..... - 64 -
Obr. č. 55: Nosná konstrukce varianty č. 4	..... - 64 -
Obr. č. 56: Numerický model varianty č. 5	..... - 64 -
Obr. č. 57: Konstrukce varianty č.5	..... - 65 -
Obr. č. 58: Detail numerického modelu varianty č.5	..... - 65 -
Obr. č. 59: Okamžitý průhyb $w_{inst,1}$ vyvolaný vlastní tíhou	..... - 67 -
Obr. č. 60: Okamžitý průhyb $w_{inst,2}$ vyvolaný dvojicí sil o velikosti 10 kN	..... - 67 -
Obr. č. 61: Statické schéma kontrolního příkladu	..... - 88 -

Obr. č. 62: Zadání nelinearity na prut typu lano v programu Scie Engineer 2014.....	- 88 -
Obr. č. 63: Uspořádání sil [27] .....	- 89 -
Obr. č. 64: Průřez lanem Standard 6x19=114.....	- 91 -
Obr. č. 65: Numerický model varianty u Lipna.....	- 99 -
Obr. č. 66: Okamžitý průhyb $w_{inst,1}$ vyvolaný vlastní tíhou .....	- 99 -
Obr. č. 67: Okamžitý průhyb $w_{inst,2}$ vyvolaný dvojicí sil o velikosti 10 kN.....	- 100 -
Obr. č. 68: Konstrukční systém zvolené varianty.....	- 106 -
Obr. č. 69: Plochy ohraničené okraji čelní plochy a referenční plochy pro vítr ve směru x.....	- 113 -
Obr. č. 70: Plochy ohraničené okraji čelní plochy a referenční plochy pro vítr ve směru y.....	- 117 -
Obr. č. 71: Numerický model řešené konstrukce .....	- 122 -
Obr. č. 72: Vlastnosti táhel Maccalloy [76] .....	- 186 -
Obr. č. 73: Model s vygenerovanými hmotami od stálého zatížení (mostovka + zábradlí). -	215

## 8.6 Seznam tabulek

Tab. č. 1: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.1 .....	- 68 -
Tab. č. 2: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.1.....	- 68 -
Tab. č. 3: Výsledky modální analýzy varianty č. 1 .....	- 69 -
Tab.č.4: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.2.....	- 74 -
Tab.č.5: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.2.....	- 74 -
Tab.č.6: Výsledky modální analýzy varianty č. 2.....	- 75 -
Tab.č.7: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.3.....	- 80 -
Tab.č.8: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.3.....	- 80 -
Tab.č.9: Výsledky modální analýzy varianty č. 2.....	- 81 -
Tab.č.10: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.4.....	- 86 -
Tab.č.11: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.4.....	- 86 -
Tab.č.12: Výsledky modální analýzy varianty č. 4.....	- 86 -
Tab. č. 13: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty č.5.....	- 92 -
Tab.č.14: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty č.5.....	- 92 -

Tab.č.15: Výsledky modální analýzy varianty č. 5 .....	- 92 -
Tab. č. 16: Výpis průřezů použitých v konstrukci lávky varianty Lipno .....	- 101 -
Tab. č. 17: Tuhost ve svislém a vodorovném směru varianty Lipno .....	- 101 -
Tab. č. 18: Výsledky modální analýzy varianty Lipno .....	- 101 -
Tab. č. 19: Shrnutí hodnot výsledků variant s vnitřními podporami.....	- 102 -
Tab. č. 20: Shrnutí dynamických vlastností variant s vnitřními podporami .....	- 104 -
Tab.č.21: Výsledky modální analýzy řešené části konstrukce.....	- 215 -

## 8.7 Seznam grafů

Graf č. 1: Pořadí variant z hlediska hmotnosti a průhybu.....	- 95 -
Graf č. 2: Pořadí variant z hlediska tuhosti ve svislém a vodorovném směru .....	- 96 -
Graf č. 3: Pořadí variant z hlediska poměru hmotnosti k tuhosti .....	- 98 -
Graf č. 4: Pořadí variant s vnitřními podporami s ohledem na jednotlivá kritéria.....	- 103 -